



# AZ ATOMENERGIA- ÉS MAGKUTATÁS ÚJABB EREDMÉNYEI

## **A neutronok szerepe a tudományban és a gyakorlatban**

Szerkesztette

**KISS DEZSŐ, NAGY ÁRPÁD  
ÉS NEMÉNYI MÁRTA**



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

## **Az atomenergia- és magkutatás újabb eredményei 4.**

**Szerkeszti  
Koltay Ede**

### **A NEUTRONOK SZEREPE A TUDOMÁNYBAN ÉS A GYAKORLATBAN**

**Szerkesztette  
KISS DEZSÓ, NAGY ÁRPÁD  
ÉS NEMÉNYI MÁRTA**

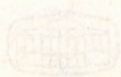
A hazai kutatói társadalom e könyvben emlékezik meg a neutron „születésének” ötvenedik évfordulójáról. A neutron — bár a neve semlegességre utal — ezen ötven év alatt nemcsak alaposan átalakította a tudományt és bizonyos mértékben az atommagról alkotott elképzelésünket, hanem jelentősen befolyásolta az egész emberiség mai életét és jövőjét. A neutron segítségével sikerült megvalósítani az atommaghasadást, a láncreakciót; a neutron az, amely a paksi erőműben széthasítja az urán atommagokat és szolgáltatja azt az energiát, amelynek mindannyian élvezői vagyunk.

E társadalmilag oly hasznos szerep mellett, sajnos, negatív képzetek is társulnak nevéhez, de erről „ő” mitsem tehet. A neutron felfedezése és felhasználása tette lehetővé az első atombomba elkészítését, alkalmazását Hirosimában és Nagaszakiban, és a mai atomfegyverek létét is. A neutron felfedezése tipikus példája az alapkutatási folyamatnak: a neutron tanulmányozása során a kutatókat kizárólagosan a tudományos érdeklődés szempontjai vezették, és senki még csak nem is álmodott arról, hogy ebből a felfedezésből valamilyen gyakorlati haszon is származhat valaha. Ám a tudomány története azt mutatja, és a neutron felfedezése is azt illusztrálja,



Az atomenergia- és magkutatás  
újabb eredményei

4



Államközi Szabad Kereskedelmi Egyezmény

**Az atomenergia- és magkutató  
újabb eredményei**

**4. kötet**

**Szerkeszti**

**KOLTAY EDE**

**A szerkesztő bizottság tagjai**

**Berényi Dénes, Csikai Gyula, Csom Gyula, Gyimesi Zoltán,  
Keszthelyi Lajos, Korecz László, Dörnyei Németh Judit,  
Pócs Lajos, Szathmári Zoltán, Szabó Ferenc, Veres Árpád**



**Akadémiai Kiadó · Budapest 1986**



# **Az atomenergia- és magkutató újabb eredményei**

## **4**

**A neutronok szerepe  
a tudományban és a gyakorlatban**

Szerkesztette

**Kiss Dezső, Nagy Árpád és Neményi Márta**



**Akadémiai Kiadó · Budapest 1986**

ISBN 963 05 3924 1

© Akadémiai Kiadó, Budapest 1986

Printed in Hungary



# Tartalom

<b>Előszó</b>	<b>7</b>
Kiss Dezső—Nagy Árpád <b>Neutronfizikai alapfogalmak</b>	<b>9</b>
Szalay Sándor <b>A neutron felfedezése</b>	<b>19</b>
Marx György <b>Sorsunk és a neutronok</b>	<b>23</b>
Csikai Gyula <b>Neutronok és a paleotudományok</b>	<b>35</b>
Kiss Dezső <b>A neutronok szerepe a magfizikai kutatásokban</b>	<b>46</b>
Kroó Norbert <b>Szilárdtest-fizikai kutatások neutronokkal</b>	<b>66</b>
Sztanyik B. László <b>Neutronok a biológiában és az orvostudományban</b>	<b>79</b>
Szabó Ferenc <b>A neutronok és az energiatermelés</b>	<b>95</b>
Szabó Elek—Bakos László <b>Neutronok a laboratóriumi és az ipari aktivációs analitikában</b>	<b>104</b>

Fábiáncsics László	
<b>Neutronok és a természeti erőforrások kutatása</b>	<b>129</b>
Nagy Árpád	
<b>Neutronok és a mezőgazdaság</b>	<b>146</b>
Veres Árpád	
<b>A neutron a mesterséges radioaktív izotópok hazai alkalmazásában</b>	<b>171</b>
Melléklet	
<b>A hazai neutronfizikai kutatások műszaki háttéréről képekben</b>	<b>185</b>



## Előszó

1982. május 5-én a Magyar Tudományos Akadémia öszszevonott közgyűlést tartott a neutron felfedezésének 50. évfordulója tiszteletére. *A neutron szerepe a tudományban és a gyakorlatban* témakörben elhangzott előadásokon jelen voltak a szakma hazai kezdeményezői és az 1955-ben kezdetben megindult magyar neutronfizikai kutatás aktív részesei, hogy megemlékezzenek a felfedezésről, méltassák annak korszakalkotó jelentőségét és természetesen azzal a célkitűzéssel is, hogy számot adjanak a hazai eredményekről és a kialakult jellemző irányzatokról.

Bátran állíthatjuk, hogy a neutron — a magfizikával egyetemben — új fizikát teremtett az elmúlt 50 év alatt. A kutatófizikus átlépett a klasszikus laboratórium világából a komputerrel, távvezérléssel, automatikával működő gyorsítók, atomreaktorok és űrhajók világába, miközben alapvetően új kapcsolatokat hozott létre a társadalommal, más tudományokkal és a gyakorlattal. A fent említett eszközök új, *adott* tulajdonságú anyagokat igényeltek. Így például 1942-ig összesen 200 tonna uránra volt szüksége a világnak (az üvegiparban és a kerámiaparban színezőként). Ezt követően napjainkig 2 millió tonnát igényelt egy új iparág — a nukleáris energetika. Tudjuk, hogy 1942-ben az embernek első ízben sikerült megvalósítania az önfenntartó láncreakciót, és ezzel megkezdte a magenergia felszabadítását. Az első magyar 2 MW teljesítményű kísérleti atomreaktor 1959. március 25-én történt üzembehelyezése meghatározó jelentőségű volt a hazai neutronfizika kibontakozására. 1982-

ben hazánkban is megindult az első ipari atomerőmű Pakson. Az anyagról szerzett új ismeretek — a mikrovilág törvényszerűségei az asztrofizika, a szilárdtest-fizika, a kémia — az élő anyag tudományával létrejött cserekapcsolatokban hasznosulnak. A kidolgozott eljárások, mérési módszerek a nyersanyagkutatásban, az orvosi, ipari, mezőgazdasági gyakorlatban széles körű alkalmazásra találnak.

Mikor a Magyar Tudományos Akadémián elhangzott előadások kibővített anyagát ezen könyvsorozat önálló köteteként közreadjuk — ezt azzal a meggyőződéssel tesszük, hogy a könyvet széles körben haszonnal forgatják majd mindazok a kutatók, mérnökök, oktatók, tanárok és felsőbb éves egyetemi hallgatók, akik munkájukat a kapcsolódó területeken kívánják végezni.

Mindazonáltal a könyvnek nem az a célja, hogy az eddig kialakult neutronfizikai ismereteket kézikönyvszerűen rendszerezze és felsorolja, hanem az, hogy a jelen néhány jellemző részletének rövid áttekintésével elősegítse a jövő neutronfizikájának kibontakozását, a tudományok közötti kapcsolatok tovább erősítését, az új módszerek elterjedését a gyakorlatban. A Neutronfizikai alapfogalmak c. fejezet megkönnyíti a könyv egyes fejezeteinek olvasását. A könyv végén lévő mellékletben a hazai neutronfizikai kutatás műszaki hátterének szenteltünk néhány oldalt — megemlékezve ezzel gépészek, elektronikusok és más szakemberek munkájáról, ami nélkül ma már a kutatás elképzelhetetlen.

Ezen az úton is szeretnénk köszönetet mondani az egyes fejezetek szakmai lektorainak: Fehér Istvánnak, Gueth Sándornak, Hraskó Péternek, Kiss Ádámnak, Szatmáry Zoltánnak és Zimányi Józsefnek, akik hasznos észrevételeikkel hozzájárultak a könyv színvonalának emeléséhez. Köszönettel tartozunk továbbá az Akadémiai Kiadó részéről Szente László felelős szerkesztőnek. Köszönet illeti még Udovicski Péternét és Muzsnai Lászlót, akik a műszaki fotók válogatásában segítettek, és az anyagot rendelkezésünkre bocsátották.

*Kiss Dezső, Nagy Árpád és Neményi Márta*  
szerkesztők



# Neutronfizikai alapfogalmak

Kiss Dezső

MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

Nagy Árpád

GATE Fizika Tanszék, Gödöllő

## A neutron elektromos töltése

Az atommag két építőelemből, protonból és neutronból tevődik össze. A protonnak egységnyi pozitív töltése van. A neutron semleges. Az, hogy a neutron elektromosan semleges részecske — tapasztalati tény; eddig nem volt olyan közvetlen vagy közvetett tapasztalat, ami ennek ellentmondana. Semmiféle alapvető fizikai elv nem írja elő, hogy az elektromos töltés kvantált legyen, hogy csak adagokban létezzen. Ezért különböző méréseket végeztek, hogy meghatározzák a neutron esetleges töltését. Ezek közül az egyik legkézenfekvőbb, hogy a neutronokat nagyfeszültségű kondenzátor lemezek között bocsátják át és mérik, hogy az elektromos tér hatással volt-e rájuk vagy sem. Az elvégzett mérések alapján a neutron töltésére korlátot tudunk mondani. Nevezetesen, ha a neutronnak van töltése egyáltalán, akkor annak abszolút értéke nem nagyobb, mint

$$q_n \leq (1,5 \pm 2,2) \cdot 10^{-20} e,$$

ahol

$$e = (1,602\,189\,2 \pm 0,000\,004\,6) \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

## A neutron tömege és átlagos élettartama

A neutron és a proton nyugalmi tömege rendre:

$$M_n = (1,674\,954\,3 \pm 0,000\,008\,6) \cdot 10^{-27} \text{ kg},$$

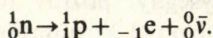
$$M_p = (1,672\,648\,5 \pm 0,000\,008\,6) \cdot 10^{-27} \text{ kg},$$

vagy ugyanezek relatív atomi tömegegységben és MeV-ban kifejezve:

$$M_n = 1,008\,665\,012 \pm 0,000\,000\,037 \text{ u} = 939,573\,1 \pm 0,002\,6 \text{ MeV},$$

$$M_p = 1,007\,276\,470 \pm 0,000\,000\,011 \text{ u} = 938,280\,0 \pm 0,002\,6 \text{ MeV}.$$

A számadatokból kitűnik, hogy Földünk és a körülöttünk lévő Univerzum tömegének több mint fele neutron. Mégis azt tapasztaljuk, hogy szabad neutronokkal alig találkozunk a természetben. Ennek egyik magyarázata az, hogy a neutron kikerülve a mag kötelékéből, instabilis részecskévé válik. Elbomlik egy protonra és egy elektronra, valamint egy antineutrínóra:



A szabad neutron átlagos élettartama csupán valamivel több, mint 15 perc:

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = 925 \pm 11 \text{ s}.$$

A szabad proton stabilis képződmény.

### A neutron mágneses dipólusmomentuma

A részecskék mágneses momentumát szokásos magmagneton egységben kifejezni:

$$\mu_{\text{mag}} = \frac{e\hbar}{2M_p} = (5,050\,824 \pm 0,000\,020) \cdot 10^{-27} \text{ A m}^2.$$

A összefüggésnek megfelelően a proton—elektron viszonyban a köztük lévő tömegarányának (1838), az elektromos töltéssel nem rendelkező neutron esetében pedig zérus mágneses momentumnak kellene kijönni. A tapasztalati tények ezzel szemben anomáliát mutatnak:

$$\begin{aligned} \mu_p &= (+2,792\,845\,6 \pm 0,000\,001\,1) \cdot \mu_{\text{mag}}, \\ \mu_n &= (-1,913\,043\,08 \pm 0,000\,000\,54) \cdot \mu_{\text{mag}}. \end{aligned}$$



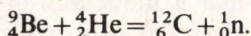
A nukleonok anomális mágneses momentumát ma annak tulajdonítjuk, hogy a proton vagy a neutron nem végső „elemi” részecske, hanem további struktúrával rendelkezik, és benne két régió jól megkülönböztethető. Van egy központi mag, melyben közel tömegtelen kvarkok mozognak és van egy nagyobb külső régió, amelyben mezonok, mezonfelhő formájában. Az anomális mágneses momentum kialakulásáért mindkét régió felelős. Részletesebb és pontosabb képet az elemirész fizika általános fejlődésétől várhatunk.

### Neutronforrások

Ha a neutron kötési energiájánál nagyobb energiát közlünk az atommaggal, elvben minden atommagból kiszabadíthatunk neutronokat (kivétel  ${}^1_1\text{H}$ ). Gyakorlatilag neutronforrásként három alaptípust elegendő megkülönböztetni.

#### Zárt radioaktív neutronforrás

A leggyakoribb céltárgymag ennél a típusnál a berillium, mivel ennek kötési energiája kicsi. A bombázórészecske alfa-sugárzó preparátumból (pl. polóniumatomból) lép ki, melyet a kívánt fajlagos aktivitással (Bq/g) készítenek, és összekevernek a céltárgymag anyagával. Az egészet zárt kapszulában helyezik el. A végbemenő magreakció a következő:



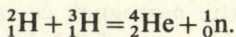
A magreakció gerjesztett állapotú szénatomot és mintegy 5 MeV átlag energiájú gyors neutront eredményez. Szokásos neutronhózáma  $10^7$  neutron  $\text{s}^{-1}$ .

#### Gyorsítóval előállított neutronok

Ebben az esetben a bombázórészecske gyorsító segítségével tesz szert a megfelelő energiára. A legelterjedtebb gyorsítótípus a J. D. Cockroftól és E. T. Waltonról elnevezett berendezés. Egyik hazai változata 120 kV gyorsító feszültséggel működik. A neutrongenerá-



torban ionizált deuterongázt gyorsítunk, mintegy 1 mA mellett, az ionnyaláb trícium céltárgymagot bombáz. A tríciumgáz magas hőmérsékleten keményfém szubsztrátum felületén van elnyelve. A végbemenő magreakció a következő:



A magreakció alfa-sugárzást és monoenergetikus, 14 MeV-os gyors neutronokat szolgáltat. Az elérhető szokásos neutronhozam  $10^{11}$  neutron  $\text{s}^{-1}$ . A szokásos neutronfluxus  $10^8$  neutron  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , néhányszor tíz köbcentiméter térfogatban.

Neutrongenerátor működik Debrecenben a KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékén és Budapesten az ELTE Atomfizikai Tanszékén. A KFKI eddig több mint 30 generátort épített és ebből 20-at szállított külföldre, főleg a szocialista országok részére.

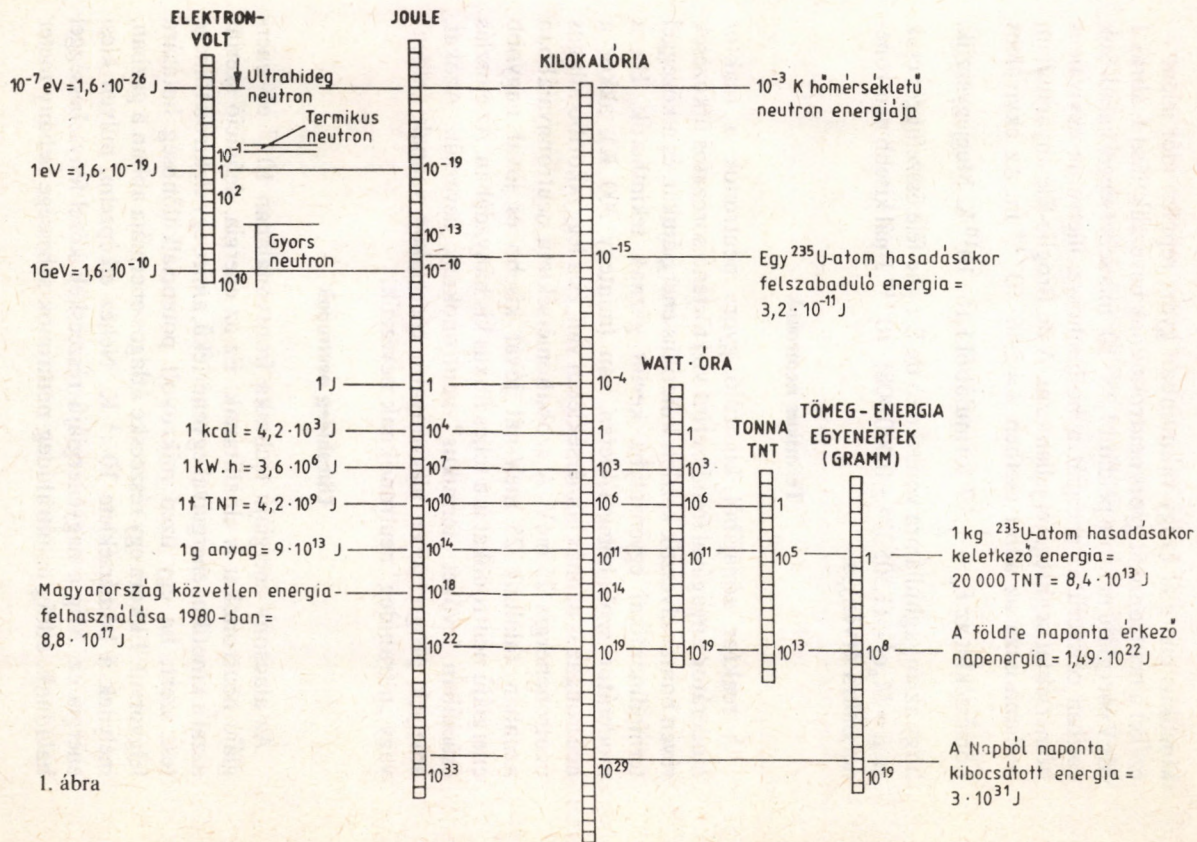
### Reaktor

A világon sok különböző típusú kutatóreaktor működik, melyeket világosan meg kell különböztetni az energiatermelés céljára épített atomreaktoroktól. Kutatás céljára használható reaktor 2 van Magyarországon; az egyik a KFKI kutatóreaktora, a másik a Budapesti Műszaki Egyetem tanreaktora. A paksi reaktor erőműként működik. A kutatóreaktor zónájában a neutronfluxus rendszert megközelíti a  $10^{14}$  neutron  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  értéket, ahova a besugárzandó anyagot pneumatikus csőpostával lehet eljuttatni, illetve kihozni. A zónából a moderátoron keresztül a biológiai védelem külső részére kivezetett neutronnyaláb már nagyságrendekkel kisebb neutronfluxust biztosít.

### A neutronok osztályozása energiájuk szerint

#### Gyors neutronok

Szabad neutronok nagy intenzitással mindenekelőtt atomreaktorokból nyerhetők, ahol ezek a maghasadás melléktermékeként keletkeznek. A maghasadásban felszabadult neutronok kezdeti energiája néhány millió elektronvolt (MeV). Mivel ez relatíve nagy



1. ábra



kinetikus energiát és így vákuumban gyors repülési időt jelent — ezeket a neutronokat gyors neutronoknak nevezzük (lásd 1. ábra). 1 MeV energiájú neutron például  $1,38 \cdot 10^7$  m/s sebességgel halad. Sok esetben célszerű az energiát a hullámhossz, illetve az ekvivalens hőmérséklet segítségével jellemezni. A de Broglie-féle anyaghullám hullámhossza az adott esetben  $\lambda = 2,86 \cdot 10^{-14}$  m. Az ekvivalens hőmérséklet az  $E_n = \frac{1}{2} kT$  formulából  $1,16 \cdot 10^{10}$  K. Megjegyezzük, hogy az anyaghullámra vonatkozó de Broglie-féle összefüggés csak az  $E = M_n c^2 = (1,505\,374 \pm 0,000\,008) \cdot 10^{-10}$  J-nál kisebb neutronenergiákra érvényes.

### Termikus neutronok

A reaktor zónájából kikerülő gyors neutronok a reaktor moderátor anyagával (rendszerint víz) történő sorozatos ütközések révén hamar elvesztik kezdeti kinetikus energiájukat, és a közeggel termodinamikai egyensúlyba került gáznak tekinthetők. Ha a moderátor szobahőmérsékleten van (mintegy 300 K), akkor a neutrongáz is azonos hőmérsékleten van, és a leggyakoribb átlagos neutronenergia 25 meV. A szobahőmérsékletű neutronnyalámban azonban találunk 25 meV-nál jóval kisebb és jóval nagyobb energiájú neutronokat is a teljes fluxus kis hányadában. Az eloszlás csúcsában levőket „termikus” neutronoknak nevezzük. Azokat, amelyek progresszíven alacsonyabb energiákon vannak „hideg” vagy „ultrahideg” neutronoknak nevezzük.

### Ultrahideg neutronok

Az alacsony energiájú technika frontvonalában  $10^{-7}$  eV energiájú neutronokat is előállítanak. Ez az energia, definíció szerint azzal a kinetikus energiával egyenértékű, amire egy elektron tömege tesz szert, ha egy tized mikrovolt potenciálkülönbség hatására felgyorsul. Ekkora egy részecske átlagos energiája abban a gázban, melynek a hőmérséklete  $10^{-3}$  K. Nehéz elképzelni, milyen kicsi energia ez. Míg a nagyenergiájú részecskék közel fénysebességgel haladnak, addig az ultrahideg neutronok sebessége néhány méter



szekundumonként; egy sportoló lépést tud tartani vele. A nehézségi gyorsulás ellenében egy méterre tud felemelkedni, mielőtt megállna és visszahullana. A  $10^{-7}$  eV energiájú részecske hullámhossza  $90 \cdot 10^{-9}$  m. Ezek a hullámok totálreflexiót szenvednek a szilárd test felszínéről, így az ultrahideg neutronokat edénybe lehet zárni.

### Neutron kölcsönhatása anyaggal

A neutron elektromosan semleges, közvetlenül nem ionizáló részecske. Az alábbiakban három folyamatot említünk, ahol neutron nukleáris kölcsönhatásba kerül az anyaggal; rugalmas ütközés, magreakció, neutronbefogás.

#### Rugalmas ütközés

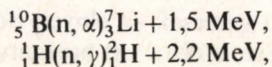
Ide azt a folyamatot soroljuk, ahol a részt vevő részecskék között a kinetikus energia megmarad. A mechanika ütközési törvénye szerint az energiaátadás akkor maximális, ha az ütközésben részt vevő részek tömege azonos. Ez az eset áll fenn neutron és hidrogénmag (pl. víz) esetén. A meglökött protonok energiája azután ionizálás és gerjesztés formájában rövid hatótávolságon belül átadódik az anyagban. Jelölése: (n, n').

#### Magreakció

Ebben a kölcsönhatásban a céltárgymag gerjesztődik. A gerjesztett mag  $T_{1/2}$  felezési idővel alapállapotba tér vissza azáltal, hogy gamma-, alfa-, proton, neutron vagy más részecskét bocsát ki magából. Ezeket a magreakciókat rendre (n,  $\gamma$ ), (n,  $\alpha$ ), (n, p) vagy (n, 2n) stb. magreakcióknak nevezzük. Így pl.  $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ ;  $T_{1/2} = 5730$  év.

#### Neutronbefogás

A neutronbefogás esetében egy lassú neutron abszorbeálódik a magban. A gerjesztett mag prompt sugárzással kerül alapállapotba, így pl:



ahol a többletenergiát rendre az alfa- és a gamma-részecskék viszik el. A kölcsönhatás valószínűsége növekszik az idővel, amit a neutron a mag közelében tölt. Így a hatáskeresztmetszet rendszerint  $1/v$  törvényt követ, amire gyakran rezonanciák szuperponálódnak. A magreakció hatáskeresztmetszete felület dimenziójú. Egysége a barn (b),  $1\text{ b} = 10^{-28}\text{ m}^2$  (az atommag közepes átmérőjének négyzete). A fenti bórreakció hatáskeresztmetszete közel 4000 b, de vannak mikrobarn hatáskeresztmetszetű reakciók, melyek vizsgálata természeti jelenségekben, vagy technikai folyamatokban egyaránt fontos.

### A neutron detektálása

A neutrontdetektálás első lépése mindig az, hogy a semleges neutront az anyaggal való kölcsönhatás révén át kell alakítani elektromosan töltött részecskévé. Az így keletkezett töltött részecske a magfizikában kialakult mérőeszközök (ionizációs kamra, GM-cső, szcintillációs számláló, félvezető detektor stb.) segítségével detektálható. Debrecenben nagy hagyománya van a nyom-film detektoroknak. A KFKI-ban szcintillációs elven működő gyorsneutron- és termikusneutron-detektorokat készítettek. Megemlítjük még a termolumineszcens technikát, ami pl. a  ${}^6\text{LiF}$ -kristálynak azt a tulajdonságát hasznosítja, hogy benne a sugárzás hatására a kristályban lévő csapdákban elektronok fogódnak be, és ott hosszú időn át megmaradnak. Mikor a kristályt felmelegítjük, a csapdába befogott elektronok fénykisugárzással alapállapotba kerülnek. Az emittált fény összege az elnyelt sugárdózissal arányos.

### Dózis és dózisteljesítmény

A sugárzás biológiai hatásának kvantitatív értékeléséhez szükség van az egységnyi tömegben elnyelt sugárzás energiájának mérésére. Az energiadózis egysége a gray (Gy):

$$1\text{ Gy} = 1\text{ J/kg.}$$

A sugárhatás gyakran nemcsak az elnyelt dózistól, de a dózisteljesítménytől is függ. Erre a célra lett bevezetve a dózisteljesítmény



( $\text{Gy s}^{-1}$ ) fogalma. A direkt kalorimetriás mérés igen nehéz, mivel az abszorbeált energia csekély. 1 Gy dózis pl. 1 kg vizet csupán  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal melegítene fel. Vegyük továbbá figyelembe, hogy a sugárzás energiája kémiai energia formájában is megkötődhet, ami nem jár hőmérséklet-növekedéssel. Dózismérésre ezért a sugárzás gázionizáló képességét használják, és az iondózis C/kg egységben van definiálva. Mivel átlagban 34 eV-ra van szükség levegőben egy ionpár létrehozásához, megadhatjuk a kapcsolatot:

$$1 \text{ C/kg} \simeq 34 \text{ Gy},$$

vagy vízre és szövetre:

$$1 \text{ C/kg} \simeq 36\text{—}38 \text{ Gy}.$$

Ezek az adatok azonban csak  $\gamma$ -sugárzásra érvényesek, töltött részecskékre vagy neutronra eltérhetnek. Különböző sugárzások azonos energiadózisa eltérő biológiai hatást válthat ki. Azt az arányt, ami egy standard sugárzás (200 kV röntgen) dózisa és bármely sugárzás dózisa között fennáll, azonos biológiai hatás mellett Relatív Biológiai Effektivitásnak (RBE) nevezzük:

$$\text{RBE} = \frac{\text{a standard sugárzás dózisa } D'(\text{Gy})}{\text{az egyéb sugárzás dózisa } D(\text{Gy})}.$$

A dózisegyenértéket sievert (Sv) egységben kell megadni:

$$D'(\text{Sv}) = \text{RBE} \cdot D(\text{Gy}).$$

A régebbi egységekkel való összefüggés:

$$1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy},$$

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}.$$

A természetes sugárterhelés standard értéke a reprodukív szervekre mintegy 1 mSv/év, amitől jelentős regionális eltérés lehetséges. A természetes terhelés fele a talajból és levegőből származik, negyede az inkorporált sugárzó magoktól, másik negyede a kozmikus sugárzástól. Ez utóbbiból csupán  $7 \mu\text{Sv/év}$ -re tehető a neutronoktól származó terhelés. Angliai felmérés az orvosi felhasználásból (diagnosztika és terápia)  $190 \mu\text{Sv/év}$  átlagos terhelést mutatott ki. A nukleáris fegyverkísérletektől származó terhelés 2000-ig  $1,2 \text{ mSv-re}$



becsülhető összesen. Az adatokból világosan kitűnik, hogy a mesterséges sugárterhelés jelenleg egyértelműen alatta van a természetes sugárterhelésnek.

### Irodalom

1. KISS D.—QUITTNER P. (szerk.) Neutronfizika. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
2. Ю. А. АЛЕКСАНДРОВ: Фундаментальные свойства нейтрона. Атомиздат, Москва, 1976.
3. E. SEGREE: Nuclei and Particles (II. kiadás). W. A. Benjamin Publ., London, 1977.
4. Ю. М. ШИРОКОВ—Н. П. ЮДИН: Ядерная физика. Наука, Москва, 1980.
5. CSENGERI PINTÉR P.: Mennyiségek, mértékegységek, számok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981 és MSz 62—78. Radioizotópok sugárzása elleni védelem.
6. В. И. ИВАНОВ—Б. П. МАШКОВИЧ—Э. М. ЦЕНТЕР: Международная система единиц в атомной науке и технике. Энергоиздат, Москва, 1981.
7. E. G. NIEMANN: Radiation Biophysics, in Biophysics. Ed.: W. HOPPE. Springer, Berlin, 1983, pp. 289—300.
8. R. GOLUB—W. MAMPE—J. M. PEDLEBURY—P. AGERON: Sci. American, June 1979, 106—119.
9. G. E. BROWN—M. RHO: Physics Today, February 1983, 24—32.
10. P. SCHOFIELD (ed.): The Neutron and its Application, 1982. Conference Series Number 64. The Inst. of Physics, Bristol and London, 1983.
11. R. G. SACHS (ed.): The Nuclear Chain Reaction — Forty Year Later. Proc. of a University of Chicago commemorative symposium, University of Chicago, 1984.

# A neutron felfedezése

Szalay Sándor

MTA Atommag Kutató Intézet, Debrecen

Megnyitóban szeretném röviden vázolni azt a helyzetet, amelyben a magfizika a neutron felfedezését megelőző időben volt és azt, hogy utána milyen rohamos fejlődésnek indult. A neutron felfedezése határkövet jelent.

Rutherford 1911-ben fedezte fel az atom magszerkezetét, amelyhez Bohr 1913-ban alkotta meg ismert elméleti modelljét. A következő nagy felfedezés ismét Rutherfordtól származott 1919-ben, amikor nitrogént alfa-sugarakkal bombázva először hozta létre az atommag mesterséges átalakítását. Ettől kezdve sok értékes kísérlet folyt a természetes radioaktív anyagokkal és azok sugárzásainak vizsgálatával, de a fejlődés viszonylag lassú volt ahhoz képest, ahogy az elmélet fejlődött. Bizonyos problémák halmozódtak azonban fel, amelyekben érezhető volt, hogy rövidesen nagy felfedezések várhatók ezen a területen.

Dirac 1928-ban megjósolta a pozitron létét. A pozitront C. D. Anderson 1933-ban Pasadena-ban ténylegesen felfedezte ködkamrával kozmikus sugarakban.

W. Bothe és H. Becker 1930-ban könnyű magokat bombázva polónium-alfa-sugarakkal, különösen berillium esetén nagyon átható sugárzást észleltek. Ezt tévesen gamma-sugárzásként értelmezték.

Bár Rutherford már 1919-ben igazolta az atommag-átalakítás lehetőségét, az 1930-as évek első feléig csak természetes radioaktív alfa-sugarak álltak bombázórészekként rendelkezésre, és ezek kis intenzitása a jelentős haladást rendkívül akadályozta. Ekkor indult



meg a világon több helyen nehéz részecskéket gyorsító berendezések fejlesztése. A Cavendish Laboratóriumban Cockroft és Walton a régi röntgentechnikából kiindulva egy kaszkád egyenirányítót, illetve részecskegyorsítót építettek fel. Van de Graaff elektrosztatikus gyorsítót épített, tekintettel arra, hogy itt nagy feszültségre, de kis áramerősségre van szükség. Lawrence 1930-ban fogott hozzá az általa elgondolt ciklotron megépítéséhez, amellyel kis feszültség periodikus alkalmazásával részecskéket akart nagy sebességre gyorsítani.

A stabilis izotópok felfedezése is a Cavendish Laboratóriumban történt, Rutherford említett vizsgálataival egyidőben. J. J. Thomson neonizotópok létét is kimutatta 1913-ban. Aston 1919-ben ugyanott, valamint Dempster az Egyesült Államokban egy-egy különböző típusú tömegspektrométert fejlesztett ki. Ezzel tisztázódott a nem kerek atomsúlyok problémája, amelyek különböző izotópok keverékei. Soddy már 1910-ben felismerte, hogy a radioaktív bomlásból eredő különböző ólomizotópok a periódusos rendszer ugyanazon helyére tartoznak, de különböző kerek atomsúlyúak. Kiderült, hogy a természetben majdnem az összes elem többféle izotópból áll. Moseley röntgenvizsgálatai szintén a Cavendish Laboratóriumban kimutatták, hogy a rendszám dönti el az atomok helyét a periodikus rendszerben, az ennél több mint kétszer nagyobb atomsúlynak ebben nincs külön szerepe.

A fentiek alapján nyilvánvaló lett, hogy a Rutherford-atommodellben szereplő atommag nemcsak protonokból, hanem a protontól különböző, vele egyenlő tömegű, de töltés nélküli részecskékből is áll. Ő ezek létezését már 1920-ban a „Bakerian Lecture”-ban hangsúlyozta és beszélt a „neutronról”, amit a proton és egy elektron valamiféle szoros egyesülésének, egybeolvadásának képzelt el. Előadása nyomán már 1920-ban, illetve a következő években több kísérletet végeztek a Cavendish Laboratóriumban a neutron kísérleti észlelésére, pl. ritkított hidrogénnel töltött gázkiszülési csővel, de sikertelenül. A radioaktív anyagok sugárzásaiban is keresték a neutron, de szintén eredménytelenül. Ha a természetben a hidrogén több deutériumot tartalmazna, és érzékenyebb neutron-detektorok léteztek volna, akkor a kiszülési kísérletek már alacsonyabb feszültségnél is eredményesek lettek volna.

Urey 1932-ben fedezte fel a vízben a deutériumot. Bothe és Becker polónium-alfa-sugarakkal bombázva berilliumot, a keletkező nagyon átható sugárzást gamma-sugárzásnak értelmezték. Kísérleteiket megismételte a Curie-Joliot házaspár is 1931-ben, valamint tőlük függetlenül Webster 1932-ben, és mind azt észlelték, hogy a sugárzás áthatolóképessége igen nagy. A Joliot házaspár azt is tapasztalta, hogy a sugárzás hidrogéntartalmú közegből protonokat lött ki, egészen 26 cm hatótávolságig. Chadwick szerint, ha ezt Compton-effektusnak tekintjük, akkor kb. 50 MeV energiájú gamma-sugárzásnak kellett volna jelen lennie, ami valószínűtlen volt.

Kimagasló tehetsége mellett és az előzmények ismeretében nem véletlen, hogy Chadwick értelmezte helyesen az új sugárzást 1932-ben, hiszen a Cavendish Laboratóriumban a neutron létét már 12 évvel előbb Rutherford megjósolta, és próbálták is felfedezni, de nem sikerült. Noha Chadwick is radioaktív alfa-sugarakat volt kénytelen használni, amelyekkel berilliumot bombázott, és proporcionális számlálót használt az észlelésekhez, ő azonnal helyesen értelmezte az észleléseket, a neutron tömegét is megbecsülte, és közel a protonéval egyezőnek találta. Feltételezve azt, hogy a neutron alkatrésze az atommagoknak, és felhasználva Aston nagy precizitású izotóptömeg-méréseit, kiszámította a neutron tömegét, és azt a proton és az elektron együttes tömegénél valamivel nagyobbbnak találta. A kötési energiát 1—2 MeV-ra becsülte, bár ma már tudjuk, hogy ez valamivel 1 MeV alatt van.

Újból hangsúlyozni kívánom, hogy akkor még magfizikai célokra csak természetes radioaktív alfa-részek álltak rendelkezésre. Ezek felhasználásával fedezte fel a Curie-Joliot házaspár 1934-ben a mesterséges radioaktivitást, és szintén berillium + alfa neutron-forrással fedezték fel Hahn és Strassmann az atommagok hasadását 1938—39-ben. Szintén ugyanilyen módon fedezte fel Fermi a neutronindukált mesterséges radioaktivitást és a lassú neutronok különösen könnyű befogását atommagokban 1934-ben.

A döntő áttörést az atommagfizika korai fellendülésében ezen rendkívül egyszerű, mégis óriási jelentőségű felfedezés után a gyorsítók rohamos fejlesztése hozta meg.

Cockroft és Walton 1932-ben első ízben érte el kis energiájú, mesterségesen gyorsított protonokkal a lítiumatommag átala-



kítását. A ciklotron és a Van de Graaff-gerjesztés is működőképes volt akkor már, de míg a Cavendishben a fő hangsúly még mindig az atommagok megismerésén volt, amazok a technikai fejlesztésben hosszú időt használtak fel, hogy tökéletessé tegyék gyorsítójukat. Később sikerült azokat is magátalakításra felhasználni, s megvetették a mai gyorsítótechnika alapjait.

Érdeemes most elgondolkozni azon, miért éppen Chadwick találta meg a neutron, illetve értelmezte helyesen a mások által felfedezett átható sugárzást? Ebben Chadwick kétségtelen kimagasló tehetségén kívül nagy jelentősége volt annak a környezetnek, háttérnek, amelyben dolgozott. A Cavendish Laboratórium szellemileg hihetetlen erős volt ebben az időszakban, Rutherford vezetése alatt. Őt Nobel-díjas volt az intézetben, és az 1932-es esztendő ugyanazon viszonylag kis laboratóriumnak két Nobel-díjat hozott, bár nem egyszerre kapták meg (Chadwick, valamint Cockroft és Walton).

Kicsit személyes élményekről is beszélhetek ezzel az idővel kapcsolatban, mert 1936-ban — bár sajnos csak fél évet — módom volt ebben a laboratóriumban dolgozni.

# Sorsunk és a neutronok

Marx György

ELTE Atomfizikai Tanszék, Budapest

## Neutronok nélküli világ

A világot régen egészen jól el tudták képzelni neutronok nélkül. A Proust-féle őselem, a *proton* és a borostyánkőről elnevezett *elektron* fogalma a múlt századból származik. A Rutherford-féle atommodell építőköveiül a proton és elektron szolgált. 1927-ben Dirac a *pozitív/negatív* kettősséget próbálta felhasználni az *atommag/elektronburok* dualizmusának értelmezésére, ezért a protont az elektron antirészecskéjének tekintette.

Mai tudásunk alapján már elkedvetlenítően unalmasnak talál-nánk egy kizárólag protonokból és elektronokból felépült világot. Neutron nélkül egyetlen stabilis atommag létezik: a  $^1\text{H}$  könnyűhidrogén-izotóp. Az egész kémia egyetlen folyamatra korlátozódna:  $\text{H} + \text{H} \rightleftharpoons \text{H}_2$ . Nem volna biológia, és ami még szomorúbb volna, nem léteznének fizikusok.

A neutron felfedezése meglepetés volt. Bothe és Joliot mindent megtettek, hogy a magreakciókat protonokkal és gamma-fotonokkal értelmezni tudják. A Természetnek kényszerítenie kellett a fizikusokat, hogy vegyék tudomásul a neutron létét. Chadwick volt, aki becsületesen engedett a realitás kényszerének (1932). A neutronokat csak 50 éve ismerjük, pedig azok adják a Föld tömegének nagyobb felét.

De vajon értjük-e, hogy a Természet miért választotta ezt az utat, miért használt két *majdnem egyenlő* tömegű részecskét: *protont* és *neutront*? (Látni fogjuk, hogy az *egyenlő* és a *majdnem* szó egyaránt hangsúlyos!) Miért dadog a Természet: miért mondja kétszer azt a szót, hogy *nukleon*? Szakszerűbben: mi rejlik az *izopsin* fedőnevet



viselő (nevében az *egyenlő*, de *mégsem* dilemmáját rejtő) szabadsági fok mögött? (Proton:  $I_3 = +1/2$ , neutron:  $I_3 = -1/2$ . Csak azt nem értjük, mi az  $I$ .)

### Kvarkok

Az atomot alkotó és az atommag-reakciókban szabaddá váló részecskéket (elektront, protont, neutron, fotont, mezonokat ...) még a hatvanas években is eleminek tekintettük, elemi részecskének neveztük. A hetvenes években tárták fel az anyagi valóságnak egy mélyebb rétegét: a *konsztituensek* világát. (Nem szép szó a konsztituens. Alkatrészt fejez ki, de a fogalomhoz nem kapcsolja a szabaddá tehető anyagdarabka szemléletes képét. Jó volna rá megfelelő magyar kifejezést találni.)

A *proton/neutron* kettősség magyarázata a konsztituensek nyelvén az, hogy kétféle kvark létezik: *u-kvark* és *d-kvark*. A laza kvark izospinje állhat *fel* vagy *le* (angolul *up* vagy *down*). Az *u-kvark* elektromos töltése  $+2e/3$ , a *d-kvark* töltése  $-e/3$ . Ugyanilyen kettősség mutatkozik a könnyű részecskék, a *leptonok* világában is: van *neutrínó* (0 töltés) és *elektron* ( $-e$  töltés). Nos, az *u-kvark* és a *d-kvark* átalakulhat egymásba, miközben a töltéskülönbözetet *leptonok* veszik át. Ez a folyamat a béta-bomlás:

$$d \rightarrow u + e + \bar{\nu}.$$

Az átalakulás során megmarad a kvarkok száma (barionszám) és megmaradónak bizonyult a könnyű részecskék száma (leptonszám) is, ami garantálja a kondenzált anyag stabilitását. (Felülhúzás antirészecskét jelöl, ennek leptonszáma  $-1$ .)

### Forró világ

A Nagy Bummot követő első mikroszekundumban olyan magas volt a hőmérséklet ( $T > 10^{18}$  K), hogy csak strukturátlan plazma létezett, ami szabad kvarkokat, leptonokat és más sugárzáskvantumokat tartalmazott. Az első mikroszekundum múltán a hőmozgás energiája 100 MeV alá csökkent. A kvarkok ekkor kvarkmolekulákká kondenzálódtak. A hűlő plazmában csak a legmélyebb energiájú kvarkmolekulák maradtak meg. Az *uud* kvarkmolekula

mért nyugalmi energiája 938,28 MeV; ennek a  $+e$  töltésű képződménynek a neve: *proton*. Az udd kvarkmolekula mért nyugalmi energiája 939,57 MeV; ez a semleges kvarkmolekula a *neutron*. A többi kombinációt hiába keresnénk: azok sokkal magasabb energiájúak. Ha véletlenül keletkeznek is, csakhamar átalakulnak  $\beta$ -bomlással protonná vagy neutronná.

Elemi fizikai szemléletünk alapján azt vártuk volna, hogy a protonszintet megemeli saját Coulomb-terének energiája. De a protonszint kicsit *mélyebben* fekszik, mint a neutronszt. Igaz: ez a két tömeg alig különbözik:

$$\frac{M_n - M_p}{M_n + M_p} = 0,0069.$$

A tömegfelhasadás oka lehet, hogy az u-kvark árnyalattal könnyebb a d-kvarknál. De akkor hol van az uuu kvarkmolekula? (Ma már tudjuk, hogy 1211,0 MeV magasságban.) Miért nem legalul? A kvarkkémiaiban sok jó kérdés merül fel, ami válaszra vár.

A Nagy Bummot követő első másodpercben lezajló ütközéseknek elegendő termikus energiájuk volt ahhoz, hogy a protont neutronná alakítsák:

$$kT > 1 \text{ MeV} > M_n c^2 - M_p c^2.$$

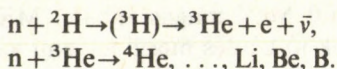
A két részecske között termikus egyensúly állt fenn, amelyben a Boltzmann-eloszlás írja le a koncentrációk viszonyát:

$$\frac{c(n)}{c(p)} \exp\left(-\frac{M_n c^2 - M_p c^2}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{10^{10} \text{ K}}{T}\right) \approx \begin{cases} 1, & \text{amíg } T \gg 10^{10} \text{ K;} \\ 0, & \text{amint } T \ll 10^{10} \text{ K.} \end{cases}$$

Az első másodperc folyamán (amíg  $T > 10^{10} \text{ K}$ ) gyakorlatilag egyenlő volt a neutronok és a protonok száma. Az első másodperc után  $T < 10^{10} \text{ K}$  csökkent, három perc alatt  $kT = 1/13 \text{ MeV}$  lett, ekkor a képlet már  $c(n)/c(p) \ll 1$  értéket adna. Az első másodperc elmúltával valóban nem keletkeztek újabb szabad elektronok, ehhez többé nem volt elegendő az ütközések termikus energiája. De a már meglévő szabad neutronok nem tűnhettek el azonnal,

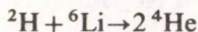


hiszen a  $n \rightarrow p$  átmenethez egy kötött d-kvarknak u-kvarkká kellett alakulnia. Ez energetikailag lehetséges, mert a neutron nyugalmi energiája (939,57 MeV) valamivel több, mint a proton és elektron energiájának összege ( $938,28 \text{ MeV} + 0,51 \text{ MeV} = 938,79 \text{ MeV}$ ). Az átalakulást végrehajtó béta-bomlás felezési ideje viszont 15 perc. Így az első percek az univerzumban számottevő mennyiségű szabad neutron túlélte. E neutronokat a protonok befoghatták és deuteron ( $^2\text{H}$  nehézhidrogén-izotóp) alakulhatott ki. A pn rendszer kötési energiája  $-2,2 \text{ MeV}$ , így a deuteron az első másodperc után ( $kT < 1 \text{ MeV}$ ) nem törhették szét az ütközések. A deuteronban a  $-2,2 \text{ MeV}$  kötési energia folytán csekély, 6%-nyi tömegdefektus lép fel. Ez farag le annyit a kötött neutron tömegéből, hogy az stabilissá válik  $n \rightarrow p$  átalakulással szemben. Így a deuteron stabilis képződmény! Belőle neutronok befogadásával (szükség esetén béta-bomlással) más összetett anyagok keletkeztek:



Közülük héjszerkezeti okokból a  $^4\text{He}$  a legstabilisabb. (A Pauli-elv szerint két p és két n fér el a legalsó energiaszinten.) Az első percekben számottevő mennyiségű He keletkezett (24%) és kis mennyiségben egyéb könnyű atommag ( $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ , Li, Be, B  $10^{-5} - 10^{-6}$  koncentrációban). A magfelépülés folyamata néhány perc múltán leállt, mert a szabad neutronok (bomlás vagy befogadás révén) elfogytak. A pozitív töltésű atommagok ütközését és további fúzióját meggátolta a Coulomb-taszítás.

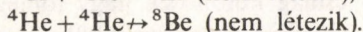
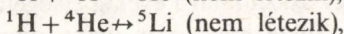
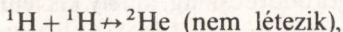
A  $^2\text{H}$ -,  $^3\text{He}$ -, Li-, Be-, B-izotópok a jövőben keresetté válnak, mert ezek a magfúziós erőművek legkiválóbb fűtőelemei. A



reakció a zárt héjú, mély energiájú  $^4\text{He}$  kialakulásához vezet, ami nagy energiaszabadulással jár. A Földön előforduló nehézhidrogén és lítium ezért nem származhat a csillagok belsejéből. Az univerzum létének első néhány percében keletkeztek, abban a rövid átmeneti időszakban, amikor még sok szabad neutron volt jelen a forró másodpercet követő „túlhűlt” világban.

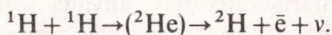
## Csillagvilág

A könnyű elemekkel szennyezett hidrogénfelhők gyorsan hűltek a táguló Univerzumban. Nem telt bele egymillió év, és a gravitáció hatására megindulhatott a felhők feldarabolódása: szuperhalmozok, galaxisok, csillagok képződtek. A gravitáció munkája fokozatosan újra több millió fokra hevítette a csillagok befelé hulló rétegeit. A legtöbb könnyű atommag csakhamar  ${}^4\text{He}$ -gé fuzionálva eltűnt. Mindössze  ${}^1\text{H}$  és  ${}^4\text{He}$  maradt vissza, mert ezek ütközése (maghéjszerkezeti okokból) nem vezet stabilis izotópra:

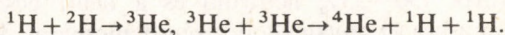


Ezért van az, hogy a csillagokban nem indult meg a fúziós láncreakció, azok nem robbantak szét hidrogénbombaként milliómod másodperc alatt.

De valami mégis táplálja a csillagsugárzást, termeli a napfényt. Az ütköző  $p + p$  rövid pillanatra  ${}^2\text{He}$ -maggá áll össze, hogy újra szétessen. De ha az átmeneti lét rövid ideje alatt bekövetkezik egy  $p \rightarrow n$  (azaz  $u \rightarrow d$ ) béta-bomlás, az így kialakult  ${}^2\text{H}$ -mag már stabilisan fennmaradhat:

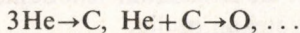


Innen már gyorsan fut a reakciólánc, hiszen nincs szükség további lassító  $p \rightarrow n$ , azaz  $u \rightarrow d$  metamorfózisra:



A reakciócsatorna  $p \rightarrow n$  metamorfózist igénylő *szükülete* nyújtja  $10^{-6}$  s-ról (hidrogénbomba)  $10^{10}$  évre (Nap) a  $\text{H} \rightarrow \text{He}$  fúzió lefutását. Ezáltal adva lehetőséget, kínálva évmilliárdokat élet kialakulására és felfejlődésére a közeli bolygókon.

A proton-túlsúlyú hidrogénfelhőből *Nap*-típusú csillagokon alakul ki az 50% proton, 50% neutron összetétel:  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ . A hidrogén kimerülésével





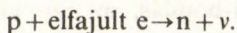
reakciósorozat következik (még mindig 50% proton, 50% neutron összetételű atommagok). Csak a csillagfejlődés késői szakaszában zsúfolódik össze annyi pozitív töltés egy magban, hogy előnyös lesz néhány további proton átalakulása neutronná. A legmélyebb fajlagos energiájú atommagban, a vasban, 54%-ra felkészít a neutronkoncentráció. De a nukleáris fejlődésben az Univerzum anyagának csupán kis hányada jutott el idáig. A világ anyaga ma is zömében hidrogén. Több a proton. Drágák a fémek.

A csillagfejlődés végállomása a Nap számára a *fehér törpe* állapot lesz. (C, O, ..., Fe összetételű, elfajult elektrongázt tartalmazó, Föld-méretűre zsugorodott csillag, amely kis felülete miatt nagyon gyengén sugároz, így százmilliárd évekig elvegetálhat.)

Ha a kiöregedő csillag különösen nagy tömegű, olyan sűrűre sajtolhatja saját gravitációja, hogy az elfajult elektronóceán Fermi-szintje magasabbra emelkedik a neutron—proton tömegkülönbség-nél:

$$E_{\text{Fermi}} > (M_n c^2) - (M_p c^2 + m_e c^2) = 0,78 \text{ MeV.}$$

Ekkor az elektronok belenyomódnak a protonba, mert a neutronképződés az elektron eltűnésével, tehát energiaszabadulással jár:



Az óriáscsillagok maradványának anyaga jórészt neutronokká alakul. Eltűnik az elektronburok, a csillag olyan sűrű lesz, mint az atommag. A *neutroncsillag* egész kiterjedése egy földi hegynek felel meg.

A fehér törpe (50—55% neutron) és a neutroncsillag (99% neutron) számunkra az anyagfejlődés végső állomásai. A fizikusok körében ma nagyon divatos *nagyszabású egyesítés* elmélete azonban azt jósolja, hogy nem lesz mindenkor így. A kvarkok  $10^{30}$ — $10^{40}$  év felezési idővel elbomlanak, a protonok, neutronok, atomok, csillagok végül sugárzássá olvadnak szét. Az Univerzum ekkor éri majd el a maximális entrópiájú állapotot.

Máig csak  $10^{10}$  év telt el. Hogy a termodinamikai egyensúly felé vezető folyamat így szét van húzva, időt engedve ezáltal a csillagászati, biológiai és társadalmi fejlődésnek, az a proton és neutron különös összjátékán múlik.

## Még több kvark

Kezdetben azt kérdeztük: miért van proton és neutron? Később a kérdést így fogalmaztuk át: miért van u-kvark és alig nagyobb tömegű d-kvark?

A feleletet a részecskefizikusok nem találták meg, de közben sikerült a kérdést alaposan elbonyolítaniok.

A proton is, a neutron is három kvarkból összetett kvarkmolekula. A kvarkok kvantumkémiájának kidolgozása során felbukkant (korábban már idézett) ellentmondások kényszerítették Gell-Mannt arra, hogy az u-kvarkoknak és d-kvarkoknak újabb szabadsági fokát fedezze fel, amit ő (csupán vidáman szemléletes megkülönböztetésként) *színnek* nevezett el. E szerint az u-kvark lehet *piros* vagy *sárga* vagy *kék*. A d-kvark is lehet *piros* vagy *sárga* vagy *kék*. Persze a *piros up* kvarkban semmi nem piros és semmi nem mutat felfelé. Csak arról van szó, hogy a kvark-konsztituenseknek van egy olyan kvantumszáma, aminek az értéke a kvarkok közt mutatkozó erős kölcsönhatást érdekli. A kvarkok elektromágneses és béta-kölcsönhatása viszont színvak. Előbbi csak a kvark töltését, utóbbi csak a kvark izospinjét (*up* vagy *down*) érzékeli. Nos, a hetvenes években ezekből az empirikusan bevezetett kvantumszámokból a Maxwell-féle elektrodinamikát utánzó matematikai elméletek fejlődtek ki, amelyek ma nagymértékben segítik eligazodásunkat a szubnukleáris világban. Ezek tükrében azt mondjuk, hogy a világunkban előforduló, atomokká kondenzálódott anyag 8 konsztituenssel dolgozik: elektron, neutrínó, háromféle színű u-kvark, háromféle színű d-kvark.

De ez még nem minden. A nagy energiákon végzett kísérletek megmutatták, hogy a 8-tagú alapgeneráció mellett a Természet magasabb szinteken újabb 8-tagú generációkkal ismétli önmagát. A második generáció tagjai a müon, müon-neutrínó, háromféle színű *c* (*csábos, charmed*) kvark és háromféle színű *s* (*szokatlan, strange*) kvark. A második generáció tagjai mindenben hasonlítanak az alapgeneráció tagjaihoz, csak nehezebbek. Ezért bomlékonyak, nem képezik a köznapi anyag tartós konsztituenseit. Még magasabban az energialetrán találtak egy harmadik generációt is: a tau-leptont, a tau-neutrínót, *t* (*tökéletes, true*) kvarkot és a *b* (*bájos, beautiful*)



kvarkot, ezek a kvarkok is három színben. (A harmadik generációt „személyesen” ismerik a magyar részecskefizikusok, hiszen a tau-lepton felfedezését 1975-ben a Nemzetközi Neutrínó Konferencia alkalmából a balatonfüredi SZOT teremben, a b-kvarkot 1977-ben az Európai Részecskefizikai Konferencia alkalmából a Villányi úti előadóteremben jelentették be amerikai kutatók a világ számára. A „tökéletes” kvarkot a CERN-ben észlelték 1984-ben, foglalt hely várta a konsztituensek periódusos rendszerében.) Az egyre hízelgőbb elnevezések csak azt tükrözik, hogy a részecskefizikusok egymást követő generációi mind nagyobb szeretettel fogadják az újonnan felfedezett konsztituenseket, mert azok váratlan megjelenésükkel egyre érdekesebbé teszik ezt a kutatási területet.

Protontól és elektrontól indultunk. A protonból, majd neutronból kvarkok lettek, az anyag 8 konsztituense. Ma 24 feles spinű konsztituenst tartunk számon (és még a kölcsönhatásukat közvetítő vektormezők kvantumait). Valahol a kvarkok eme multipllett rendszerében rejlik a neutron—proton kettősségének (különösen szoros dublettjének) a magyarázata. De nem nagyon értjük, miért „szebb” a világ — logikailag — ezektől a multipllettektől? Miért ismétli magát sokszorosan és ilyen triviális módon a Természet?

Említettük, hogy a matematikai leírás a Maxwell-egyenletek nyomdokán halad. A Maxwell-elmélet mértékszimetriáját egy kommutatív csoport írta le, az egyenletek lineárisak voltak. A sokkomponensű új elméletek mértékcsoportjai nemkommutatívak, a megfelelő egyenletek nem lineárisak. A nemlinearitásból adódó polározódási hatások a kvark-konsztituensek olyan bezáródását eredményezik, amit az ionizációval kiszabadítható elektronoknál nem tapasztaltunk. Itt lehet az atommag/atomburok minőségi különbségének gyökere. De ehhez a három szín önmagában is elegendő volna . . .

Ha az *up* és *down* tömegegybeesést (illetve finom tömegfelhasadást) meg akarjuk érteni, akkor a részecskefizikusok rejtélyes arccal így válaszolnak: „Hja, a tömegek eredete máshol keresendő, talán a Higgs-szektorban, amit az elméletiek sem értenek egyértelműen, a kísérletiek meg semmi olyant nem észleltek, ami ebbe az irányba mutatná az utat. . .”

## Egy ezrelék differencia

Vessünk egy pillantást a részecskék és a konsztituenseik tömegspektrumára! Szép szeszéllyel szanaszéjjel helyezkednek el az egyes objektumok. Csak az u- és d-kvark, meg a belőlük képezett *proton és neutron* vonala fekszik egymáson (1. ábra).

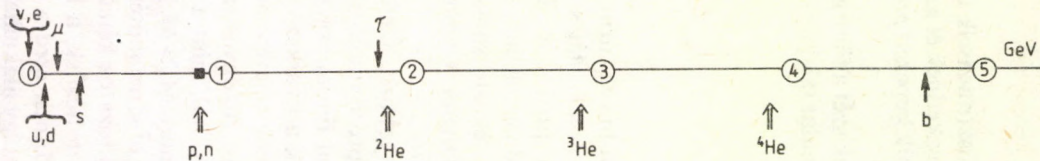
Egy mesebeli nagyítóval 1000-szeresre húzzuk szét a tömegspektrumnak azt a részét, ahol a proton-neutron vonalat találjuk. Ekkor vesszük észre a parányi felhasadást (2. ábra):

$$0 < \frac{M_n - M_p}{M_n + M_p} < 1\text{‰}.$$

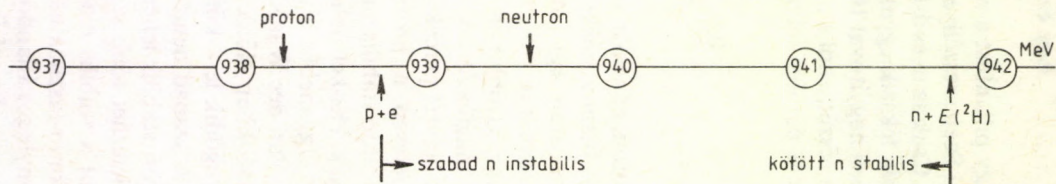
Ha nem a proton, hanem a neutron bizonyult volna egy árnyalattal könnyebbnek, bizony másképp alakulhatott volna a világ sorsa. A Nagy Bumm után egy másodperccel nem protonok, hanem neutronok maradtak volna vissza. Nem hidrogénfelhő, hanem neutronhalmaz. Utóbbiban nem gátolta, nem fékezte volna Coulomb-gát a magfúziót. A világtörténelem Divina Commediája évmilliárdok helyett percek alatt lepergett volna . . .

De történetesen a proton sikerült könnyebbre. Önmagára hagyatva a proton stabilis alakulat. A neutron protonra bomlik. De a neutron csak 1‰-kel nehezebb, ami nagyon finom vonalfelhasadást jelent. Ugyanebbe a nagyságrendbe esik a kvarkmolekulák közt fellépő „Van der Waals”-kölsönhatás (eredeti nevén: magerő) által atommagokban előidézett tömegdefektus. Bizonyos magokban több faragódik le a kötött neutron tömegéből, mint a kötött protonéból. A szabad neutron nem stabilis (mert  $M_n > M_p$ ). De a kötött neutron stabilis lehet (mert  $M_n c^2 - M_p c^2 < \text{magkötés energiája}$ ), ezért létezhet több száz izotóp, ezért változatos kémiailag a világ. Viszont a stabilis magok mind pozitív töltésűek, a köztük fellépő Coulomb-taszítás nehezíti fúziójukat. Innen ered a kémiai elemek viszonylagos állandósága. Hogy mindez így alakulhasson, a neutron—proton tömegfelhasadásnak nagyon szűk intervallumba kellett esnie.





1. ábra. A konsztituensek tömegspektruma



2. ábra. A ■ rész 1000-szeres nagyításban

## A deuteron szerencsége

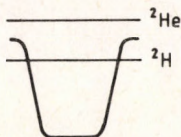
A kvarkmolekulák közt ható magerő (akárcsak a kémiai molekulák közt ható Van der Waals-erő) szekunder jelenség, ezért rövid  $\Delta x$  hatótávolságú. A  $\Delta x$  méretű atommagba zárt nukleon számára a  $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$  határozatlansági összefüggésből

$$E_m = \frac{p^2}{2M} = \frac{\hbar^2}{2M(\Delta x)^2}$$

mozgási energia adódik. Így a deuteron energiája a következőképpen jön létre:

$$E(^2\text{H}) = M_p c^2 + M_n c^2 + \frac{\hbar^2}{2M \cdot (\Delta x)^2} - U.$$

$M_p c^2$  és  $M_n c^2$  az erős direkt kvarkcsatolásból származik (kb. 1000 MeV). Az  $U$  a szekunder magerő energiája (kb. 50 MeV).  $U$  értékét majdnem túlkompenzálja az  $E_m$  mozgási energia. A deuteron mozgási energiája alig 2 MeV-rel alacsonyabb az  $U$  kölcsönhatási energiánál, a deuteron nagyon lazán kötött alakulat (3. ábra). Két proton közt valamivel kisebb  $U$  értéke (a kötés ellen dolgozik a Coulomb-taszítás és a magerők spinfüggése), ezért két protonból nem alakulhat ki kötött rendszer. A  $^2\text{He}$ -mag nem stabilis képződmény (3. ábra).



3. ábra. A két nukleon-rendszer

Ha a nukleonok tömege valamivel kisebb lenne, mondjuk 900 MeV, akkor a mozgási energia nagyobb lenne, és a magerő nem volna elég a deuteron együtt-tartására. Az ősi hidrogénfelhők anyagából a Napon és más csillagokban nem indulhatott volna meg a nehéz magok felépülése. Nehéz elképzelni, miként alakult volna a világ sora.



Ha a nukleonok tömege valamivel nagyobb lenne, mondjuk 955 MeV, akkor némileg enyhült volna a belső mozgás is a mag belsejében. Nem csupán a  ${}^2\text{H}$ , de a  ${}^2\text{He}$  is stabilis lenne. A  $p \rightarrow n$ , azaz a  $d \rightarrow u$  átalakulás szükülete nem lassította volna le a Nap nevű hidrogénbomba explózióját milliomod másodpercről milliárd évekre.

De a proton és a neutron tömege éppen 900 és 955 MeV közé esik. Ezen múlik, hogy létezik  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^2\text{He}$  viszont nem létezik. Nem pontosan egy helyre esnek: a neutron ezreléknyivel feljebb van. Ezen múlik, hogy létezőnk és ilyen a világ. Miért van ez így? Jó kérdés. Érdemes választ keresni rá.

# Neutronok és a paleotudományok

Csikai Gyula

KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék, Debrecen

## Bevezetés

Az élő és élettelen természet törvényszerűségeinek, fejlődéstörténetének feltárásához nélkülözhetetlenek azok az adatok, amelyek a távolabbi múltban lejátszódott jelenségekről adnak információt. A természeti folyamatokban megfigyelt trendek és azok értelmezése alapján a jövőben várható eseményekre is következtethetünk.

A neutronok felfedezésével a paleotudományok terén is új vizsgálati lehetőségek nyíltak. Így pl. a neutronaktivációs és prompt sugárzásos analízis gyors, roncsolásmentes meghatározást tesz lehetővé egyidejűleg nagyszámú elemre a minta mennyiségétől és geometriai formájától függetlenül. Az előforduló elemek típusának, relatív koncentrációjának meghatározása révén a különböző helyről származó leletek (használati tárgyak, képek, szobrok, érmék stb.) azonosíthatók. Az egyes elemek atomszázalécai közötti korreláció felderítésével az előforduló vegyületek típusára is következtethetünk. Ez utóbbi különösen a kozmikus térségből származó minták összetételének meghatározásánál, valamint a földtörténet különböző időszakában a földkéregben lejátszódott jelenségekre történő visszakövetkeztetés szempontjából jelentős. Az organikus maradványok, a fosszilis csontok, a régészeti leletek vizsgálata többek között az ember fejlődéstörténetéhez, a termőterületek változásaihoz, a népvándorlások idejének és okának felderítéséhez nyújthat fontos információkat.

A legtöbb vizsgálandó minta nagyszámú elemet igen eltérő koncentrációban tartalmaz, amelyek nukleáris módszerekkel történő meghatározását döntően elősegítette a félvezető gamma-

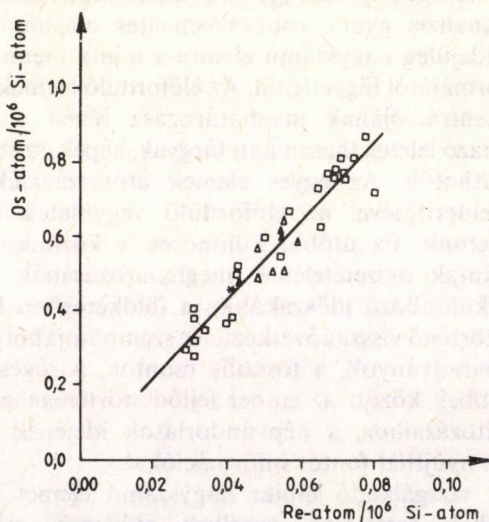


spektrométerek elterjedése, és a különböző energiájú neutronokat szolgáltató források létrehozása. Ezek a vizsgálati eszközök hazánkban is rendelkezésre állnak, így pl. a KFKI és a BME atomreaktora, több neutrongenerátor Budapesten és Debrecenben és más típusú neutronforrások, többek között a spontán hasadó  $^{252}\text{Cf}$  is. A legtöbb vizsgálat termikus neutronokkal történt az  $(n, \gamma)$  és  $(n, \alpha)$  reakció révén, de számos esetben (pl. a N, Si, O, Al, Th, U stb. meghatározásánál) a gyorsneutron-reakciókat alkalmazták.

A neutronok felhasználásával történt sokirányú vizsgálat közül néhányat az alábbiakban említek meg:

### A kozmikus térség vizsgálata

Számos vizsgálat történt a meteoritok Si, Fe, Ni, Ir, Re, Os, Au tartalmának meghatározására [1]. Az Ir—Re és az Os—Re, amelyekre a kondenzációs hőmérséklet magasabb mint a vasra, erős korrelációban van a különböző típusú meteoritokban (1. ábra).



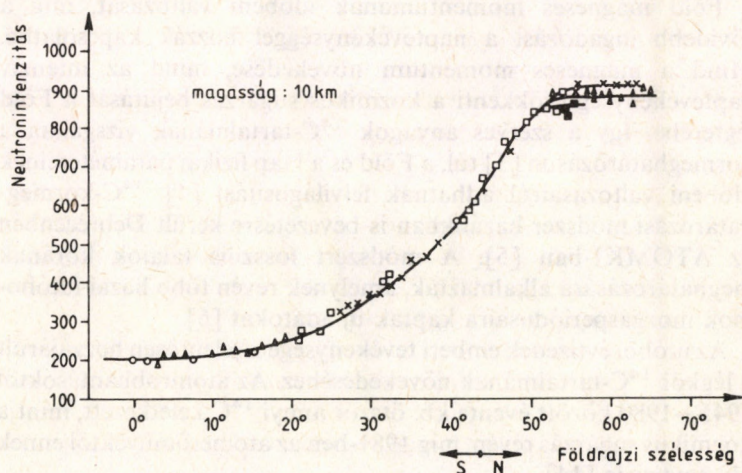
1. ábra. A különböző meteoritok Os—Re koncentrációjának korrelációja

Tisztázták azt is, hogy az egyes kondenzációs fázisok milyen elemeket dúsítanak be [2]. Mind a meteoritok, mind a holdközetek vizsgálata során kiderült, hogy az izotóparányokban a földihez képest nincs eltérés, ami a Naprendszer egyidejű keletkezésére utal.

Termikus és gyors neutron aktivációs analízissel hazai kutatók is számos elem koncentrációját határozták meg kozmikus és földi eredetű mintákban [11, 12], így pl. az oxigén- és szilíciumtartalmat, a Luna 16 által a Holdról hozott kőzetekben [13].

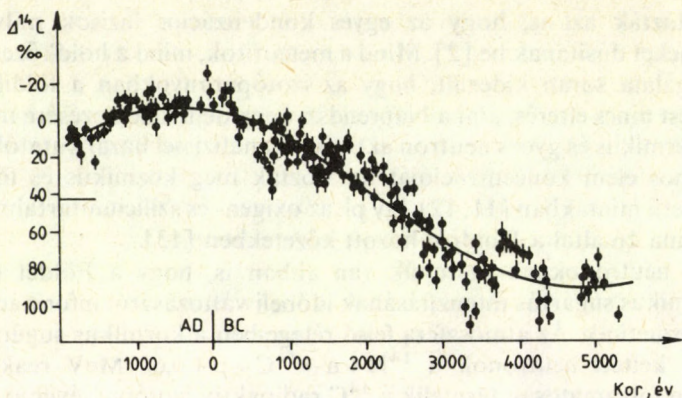
A neutronoknak szerepük van abban is, hogy a Földet érő kozmikus sugárzás intenzitásának időbeli változásáról információt szerezhetünk. Az atmoszféra felső rétegeiben a kozmikus sugárzás által keltett neutronok a  $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p + 0,62 \text{ MeV}$  reakció révén folyamatosan termelik a  $^{14}\text{C}$  radioaktív izotópot, évente 7,5 kg-ot, amelynek felezési ideje 5730 év.

A légkörben minden kozmikus neutron jó közelítésben egy  $^{14}\text{C}$ -atomná konvertálódik, a kozmikus sugárzás földrajzi eloszlásának megfelelő koncentrációval. Amint a 2. ábrán látható, a sarkok közelében jóval több neutron keletkezik, mint az egyenlítőnél. A felszíntől kb. 10 km távolságban a  $^{14}\text{C}$ -ből  $\text{CO}_2$  jön létre, amit a légörvények egyenletesen elkevernek az atmoszférában, és így a



2. ábra. A légkörben keletkező neutronok földrajzi eloszlása





3. ábra. A  $^{14}\text{C}$  koncentrációjának időbeni változása

radioaktív szén bekerül a biológiai körforgalomba. Pontos mérések szerint a  $^{14}\text{C}$  keletkezési ütemében egy 9000 éves periódusú változás van, amire egy kb. 400 éves kisebb amplitúdójú fluktuáció szuperponálódik (3. ábra). A hosszú idejű szinuszos periódus követi a Föld mágneses momentumának időbeni változását, míg a rövidebb ingadozást a naptevékenységgel hozzák kapcsolatba. Mind a mágneses momentum növekedése, mind az intenzív naptevékenység csökkenti a kozmikus sugárzás bejutását a Föld légterébe. Így a szerves anyagok  $^{14}\text{C}$ -tartalmának vizsgálata a kormeghatározáson [3] túl, a Föld és a Nap fizikai paramétereinek időbeni változásairól adhatnak felvilágosítást [4].  $^{14}\text{C}$ -kormeghatározási módszer hazánkban is bevezetésre került Debrecenben az ATOMKI-ban [5]. A módszert fosszilis talajok korának meghatározására alkalmazták, amelynek révén több hazai futóhomok mozgásperiódusaira kaptak új adatokat [6].

Az utóbbi évtizedek emberi tevékenysége is jelentősen hozzájárult a légkör  $^{14}\text{C}$ -tartalmának növekedéséhez. Az atomrobbantásoktól 1945–1980 között évente kb. ötször annyi  $^{14}\text{C}$  keletkezett, mint a kozmikus sugárzás révén, míg 1981-ben az atomerőművektől ennek kb. egytizede [14].

## Kőzetek, ásványok kora

A kőzetekben, ásványokban, vulkáni üvegekben előforduló urán a spontán hasadás révén lehetőséget ad a megszilárdulásuk óta eltelt idő meghatározására. A  $^{238}\text{U}$ -izotóp kis valószínűséggel (kb.  $10^{17}$  U-atommagból évente egy) spontán széthasad. A nagy energiájú fragmentek hatótávolsága a kőzetekben kicsi, kb.  $20\text{ }\mu\text{m}$ , azaz lokálisan nagy energialeadás történik. Ez a sugárrombolt rész évmilliárdokon át megmarad, ha a szilárd közeg nem hevül száz  $^{\circ}\text{C}$ -ra. Az ásvány felületét hidrogén-fluoriddal maratva optikai mikroszkóppal megfigyelhető nyomokat kapunk. Ezek felületi sűrűsége ( $N_s$ ) arányos az  $^{238}\text{U}$ -koncentrációval ( $N_8$ ), a spontán hasadás valószínűségével ( $\lambda_{sf}$ ) és az ásvány megszilárdulása óta eltelt idővel ( $T$ ). Az  $N_s$  meghatározása után a mintát lassú neutronokkal besugározva, az  $^{235}\text{U}$  hasadása révén, újabb nyomokat kapunk, amelynek koncentrációja ( $N_i$ ) arányos az integrális neutronfluxussal ( $\Phi t$ ), a  $^{235}\text{U}$  koncentrációjával ( $N_5$ ) és a hasadási hatáskeresztmetszettel ( $\sigma$ ):

$$N_s = K N_8 \lambda_{sf} T, \quad N_i = K N_5 \sigma \Phi t,$$

ahol  $K$  a kísérleti körülményektől függő arányossági tényező. Mivel az  $N_s/N_8$  arány jól ismert, így az  $N_i$  mérése alapján  $T$  az alábbi összefüggésből meghatározható. Az adatokat az urán alfabomlására korrigálva,

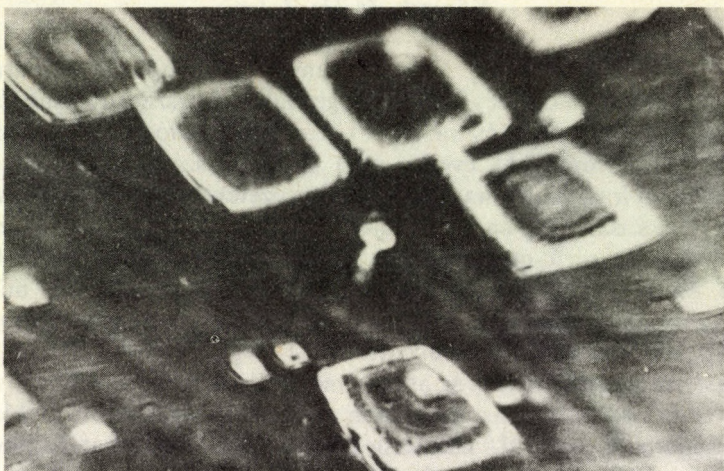
$$T = 4,375 \cdot 10^{-8} \frac{N_s}{N_i} \Phi t \text{ (év)},$$

ahol  $\lambda_{sf} = 8,42 \cdot 10^{-17} \text{ év}^{-1}$  és  $\sigma = 586 \text{ barn}$ .

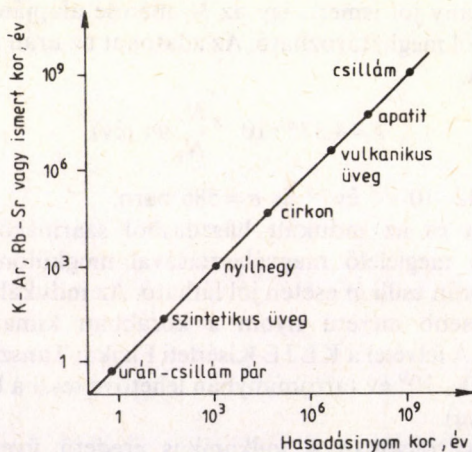
A spontán és az indukált hasadásból származó nyomok a maratási idő megfelelő megválasztásával megkülönböztethetők, amint a 4. ábrán csillám esetén jól látható. Az indukált hasadásból származó kisebb méretű nyom a korábban kimart helyén is felismerhető. A felvétel a KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékén készült. A módszer  $10$ – $10^9$  év tartományban lehetővé teszi a kormeghatározást (5. ábra).

Az ősi civilizációban a vulkanikus eredetű üveget gyakran alkalmazták. Ezek kevés kivétellel megőrizték a geológiai történetü-

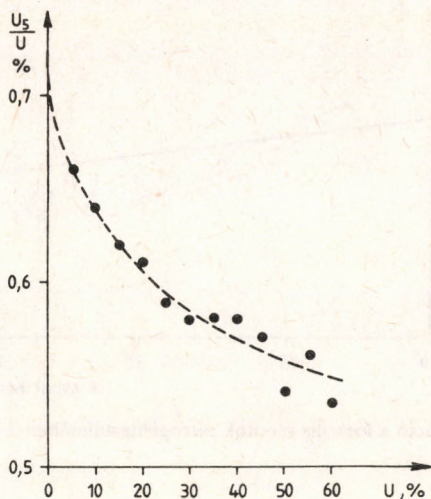




4. ábra. Spontán (nagy) és indukált (kicsi) maghasadásból származó nyomok csillámban



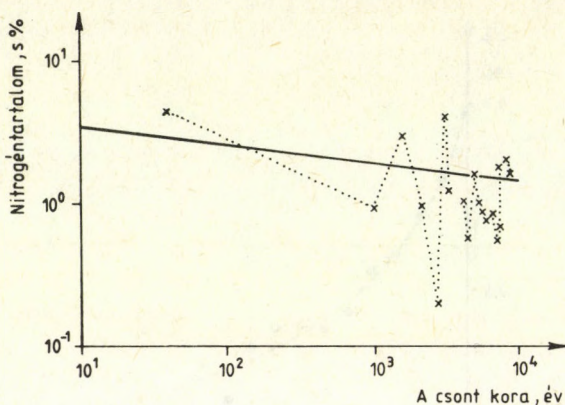
5. ábra. A hasadási nyom kormeghatározási módszer hitelesítése



6. ábra. Az  $^{235}\text{U}$  gyakoriságának függése az urán koncentrációjától, Oklo környéki mintáknál

ket rögzítő hasadási nyom „órát”. A felhevítés az órát nullázta, és így a mai nyomosság a múltban bekövetkezett eseményről ad számot. Így sikerült tisztázni, hogy a különböző földrajzi helyen lévő barlangokban mikor jelent meg az ember és rakott tüzet, vagy a lávakitörések hogyan követték időben egymást. A módszer feltételezi, hogy a természetben az  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  izotópok aránya a lelőhelytől függetlenül azonos, vagyis a  $^{235}\text{U}$  0,72%-ban fordul elő. Francia kutatók 1972-ben azt észlelték, hogy Gabonból az Oklo uránbányából származó mintákban 0,29%-os  $^{235}\text{U}$ -koncentrációt, az uránt nagy mennyiségben tartalmazó ércekben találták, amit a 6. ábra szemléltet. Szisztematikus vizsgálatok kiderítették, hogy ezen a helyen  $1,8 \cdot 10^9$  évvel ezelőtt a lokálisan magas uránkoncentráció miatt egy természetes atomreaktor működött 600 ezer évig 25 kW átlagos teljesítménnyel [7, 8]. A  $^{238}\text{U}$  és a  $^{235}\text{U}$  izotópok felezési idejének aránya olyan, hogy 1,8 milliárd évvel ezelőtt a  $^{235}\text{U}$ -izotóp gyakorisága 3% volt, ami megfelel a mai erőművekben használt dúsításnak.





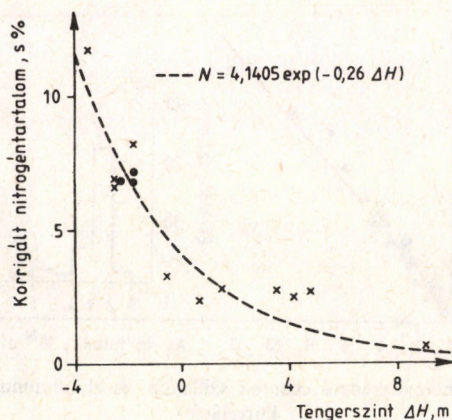
7. ábra. Fluktuáció a fosszilis csontok nitrogéntartalmában a kor függvényében

A neutronok anyaggal történő kölcsönhatására vonatkozó mai ismereteink tették lehetővé a földtörténet ezen kezdeti szakaszában lejátszódott szokatlan jelenség és következményeinek értelmezését. Így pl. megváltozott több stabilis elem (Cd, Sm, Eu, Gd) izotóparánya a környező ásványokban a neutronabszorpció — vagy a hasadási termékek járuléka — miatt. A Xe, Kr, Nd, Sm elemeknél tapasztalt izotóparány-eltolódás megegyezik az  $^{235}\text{U}$  termikus neutronokkal történő hasadásánál észlelttel [9]. A felhasznált nukleáris adatok meghatározásához a hazai kutatóhelyek is érdemlegesen hozzájárultak.

A kontinensek vándorlásának elméletében feltételezik, hogy Afrika és Dél-Amerika egy egységet képezett. Ezért a brazíliai partvidéken Gabonnak megfelelő földrajzi helyen vizsgálják az uránminták izotópösszetételét. Ugyanis az Oklo reaktor kora a Prekambrium időszakára esik, amikor még a kontinensek feltehetően együtt voltak. Az eddigi ilyen irányú vizsgálatok negatív eredménnyel zárultak.

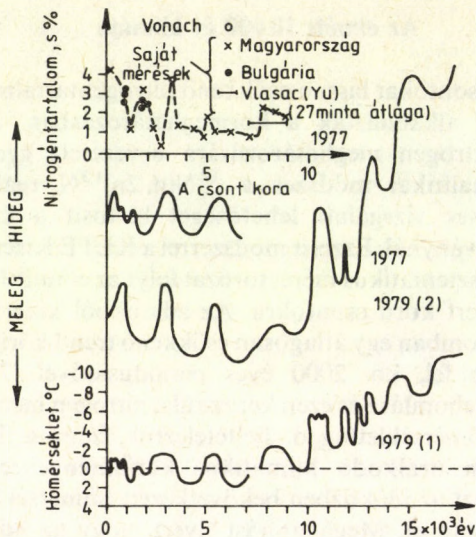
## Az elmúlt 10 000 év klímája

A fosszilis csontokat lassan csökkenő nitrogéntartalmuk alapján széles körben alkalmazták a kormeghatározásban. Az 1970-es években a nitrogén meghatározására bevezetett gyorsneutron-aktivációs analitikai módszer a  $^{14}\text{N}(n, 2n)^{13}\text{N}$  reakció révén roncsolásmentes vizsgálati lehetőséget biztosít a kevésszámú, értékes maradványnál. Ezzel a módszerrel a KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékén szisztematikus mérésorozat folyt az elmúlt 10 000 évből származó ismert korú csontokra. Az adatokból kiderült, hogy a nitrogéntartalomban egy átlagosan csökkenő trend körül igen nagy fluktuáció lép fel, kb. 2000 éves periódusidővel (7. ábra). A szervesanyag lebomlása és ezen keresztül a nitrogén mennyiségének csökkenése hőmérsékletfüggő. Feltételeztük, hogy a fluktuáció a temetés idején uralkodó klimatikus körülményekre vezethető vissza, mivel ezt az időközben bekövetkezett hőmérséklet-változások nem mosták el. Megállapítást nyert, hogy az adott korhoz tartozó tengerszint (hőmérséklet) és a csont nitrogéntartalma között egyértelmű kapcsolat van; a hőmérséklet növekedésével a nitrogén tartalom csökken (8. ábra).

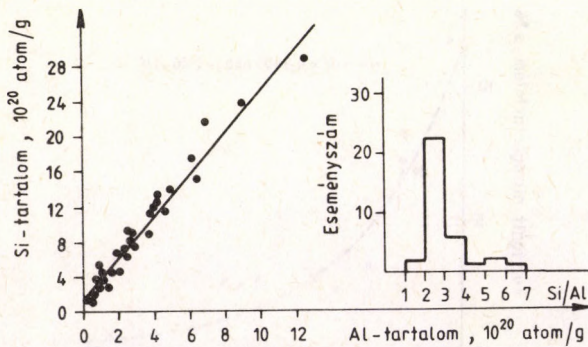


8. ábra. A fosszilis csontok nitrogéntartalmának függése a temetés idején uralkodó hőmérséklettől (tengerszint)





9. ábra. Korreláció a klímaváltozások és a csont nitrogéntartalma között



10. ábra. A különböző eredetű csontok szilícium- és alumíniumtartalma közötti korreláció

A korrelációt igazolja az is, hogy a különböző módszerrel megállapított klímagörbéket a nitrogéntartalom jól követi (9. ábra). Így az ismert korú fosszilis csontokat, mint paleo-hőmérőt lehet használni [10]. Ilyen vizsgálatok történtek Bulgáriából származó csontokon, amelyekből kapott hőmérsékletértékek jól egyeznek a más módon meghatározottakkal.

A neutronaktivációs módszer lehetőséget adott a csontokban előforduló elemek közötti korreláció kimutatására, és ennek révén a szerves anyagokban jelenlévő agyagásvány típusának meghatározására (10. ábra) is.

Kiderült, hogy a természetben előforduló több száz agyagásvány közül a fosszilis csontok szervesanyagában csupán kettő, a vermikulit és a montmorilonit  $1/3:2/3$  arányú keveréke található amorf formában. A fosszilizáció mechanizmusának tisztázása további vizsgálatokat igényel.

A fentiekben említett néhány példa is jól illusztrálja, hogy a neutronok alkalmazása jól egészíti ki a különböző tudományterületeken használt vizsgálati módszereket, és elősegíti az inter- és multidiszciplináris kutatásokat.

## Irodalom

1. S. FLEMING: Dating in Archaeology. Dent and Sons Ltd., London, 1976.
2. J. W. MORGAN—J. F. LOVERING: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **31** (1967) 1893.
3. W. LIBBY: Radiocarbon dating. Chicago University Press, Chicago, 1951.
4. H. E. SUESS: *Journ. Geophys. Res.* **75** (1970) 2363.
5. CSONGOR É.—HERTELENDI E.: *ATOMKI Közlemények* **23** (1981) 189.
6. É. CSONGOR—Z. BORSY—I. SZABÓ: *Radiocarbon* **22** (1980) 774.
7. G. W. WETHERILL—M. G. INGRAM: in *Proc. of the Conf. on Nuclear Processes in Geologic Settings*, Williams Bay, Wiss., 1953.
8. M. MAURETTE: *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **26** (1976) 319.
9. CSIKAI Gy.: *Fizikai Szemle* **XXVIII** (1978) 1.
10. Cs. BUCZKÓ M.: *Acta Phys. Debrecina* **XXII** (1981) 7.
11. GUETH S.: *Fizika* 1978. Gondolat Könyvkiadó, Budapest, 1978.
12. J. CSIKAI: *Atomic Energy Review* **11/3** (1973) 415.
13. Á. NAGY—A. CSÖKE—L. BAKOS—E. SZABÓ: *Radiochem. Radioanal. Lett.* **11/5** (1972) 321.
14. Z. JAWOROWSKI: *IAEA Bulletin* **24/2** (June 1982) 35.



# A neutronok szerepe a magfizikai kutatásokban

Kiss Dezső

MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

## Bevezetés

A neutronok 50 évvel ezelőtti felfedezése, amely megünneplésének keretében tartjuk ezt az ülésszakot, szorosan összefonódott a magfizika 30-as évek elején tapasztalt rohamos fejlődésével. Az 1932-es év nagyon sok szempontból meghatározó volt a magfizika számára, és azóta nem látott bőségben ontott alapvető, fontos eredményeket. Tulajdonképpen a neutronfizika a magfizikának egy ága, ugyanúgy, ahogy a neutron egy a magfizikai kutatások tárgyát (és eszközét) képező részecskék között. Bizonyos értelemben nem is lehet neutronfizikáról beszélni, csak magfizikáról. A neutronok felfedezése a magfizikai kutatásoknak az eredménye, felhasználása szorosan összefügg a magfizikával és alkalmazása a magfizika alkalmazásának tekinthető.

Ugyanakkor mégis látszanak bizonyos karakterisztikus különbségek, amelyek a neutronokat megkülönböztetik a többi atomi részecskéktől. Ezek a karakterisztikus jegyek gyakorlatilag azzal függenek össze, hogy a neutron a protonnal közel azonos tömegű, de elektromosan semleges részecske. Ennek messzemenő következményei vannak. Az egyik az, hogy a neutronok semlegességük révén behatolhatnak bármilyen atommagnak (a nehezeknek is) a belsejébe, rájuk nem hat a taszító Coulomb-gát, és a töltött részecskékkel ellentétben nem kell nagy energiával felgyorsítani őket, hogy magreakciót hozzunk létre. Ugyancsak a semlegességük következménye, hogy a neutronok előállítása különleges módszerekkel történik, amelyek eltérnek a töltött részecskék előállításától. Külön fejezet a neutron detektálása, hiszen valamennyi detektor

működésének alapelve az ionizáció, amelyre az elektromosan semleges neutronok nem képesek. Éppen ezért két lépésben kell megoldani a detektálást: az első lépésben át kell konvertálni a neutront elektromosan töltött részecskévé, és a második lépésben ezeket kell detektálni. A neutronok kiemelkednek a magfizikai részecskék közül gyakorlati fontosságuk révén is (hasadás, reaktor, atombomba).

A magfizika és ezen belül a neutronfizika rohamos fejlődést tett meg az 1930-as évektől az 1960-as évek végéig. Ebben az időben a neutronfizika elsősorban magfizikai jellegű volt. A későbbiek során a szerepe módosult: megtartva gyakorlati fontosságát az energetikában és a katonai kérdésekben, bizonyos mértékig veszített súlyából és presztízséből a magfizikában. Bár ma is nagyon fontos magfizikai vizsgálatok folynak neutronokkal szerte a világon és így hazánkban is, észlelhető az a tendencia, hogy a valaha sztárszerepet betöltő részecskék magfizikai felhasználása csökkent. Ezzel szemben nőtt a neutronok szilárdtest-fizikai, biológiai, kémiai, stb. alkalmazása. A magfizikán belül viszont megfigyelhető, hogy az érdeklődés a közép- és nagyenergiák (GeV tartomány) felé toldott el.

Hazánkban a felszabadulás után, a magfizikával majdnem egyidőben, elkezdődtek a neutronfizikai vizsgálatok is, elsősorban magfizikai aspektussal. Kezdetben neutronforrásként radioaktív neutronforrások szolgáltak, amelyek viszonylag könnyen elérhetők és beszerezhetők voltak. E „hősi” periódus elmúltá után megépültek hazánkban több helyen a neutrongenerátorok, azaz az olyan kaszkádgyorsítók, amelyek előnyösen alkalmazhatók neutronok előállítására. 1956 után pedig megjelent a színen a reaktor, mint bőséges termikusneutron-forrás. Ennek megfelelően ma neutronfizikai vizsgálatok reaktorokkal és neutrongenerátorokkal folynak. Bár a reaktor bőséges termikusneutron-forrás, és messze kiemelkedik az egyéb neutronforrások közül, a vele való kísérletek jelentősége csökkent, a legtöbb fundamentális kérdés többé-kevésbé tisztázódott. Nem szűnt meg, sőt növekedett a neutrongenerátorok neutronforrásként való felhasználásának jelentősége. Hazánkban több, neutronfizikával foglalkozó műhely is kialakult. Ezeknek az utóbbi 5—10 évbeni munkásságáról szeretnék rövid és teljességre



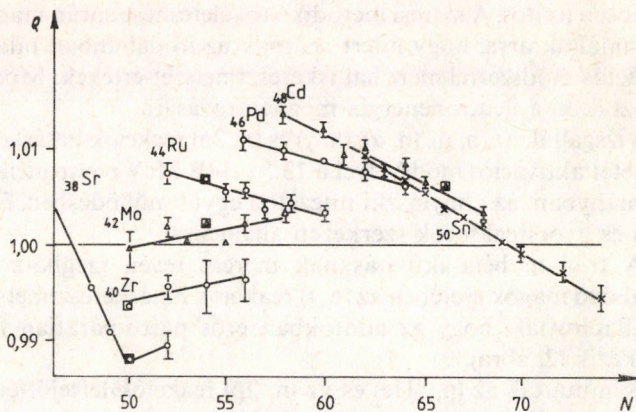
nem törekvő ismertetést adni, inkább azzal a célkitűzéssel, hogy benyomást adjak erről a területről, mintsem hogy részletes ismereteket szolgáltatassak.

### KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék

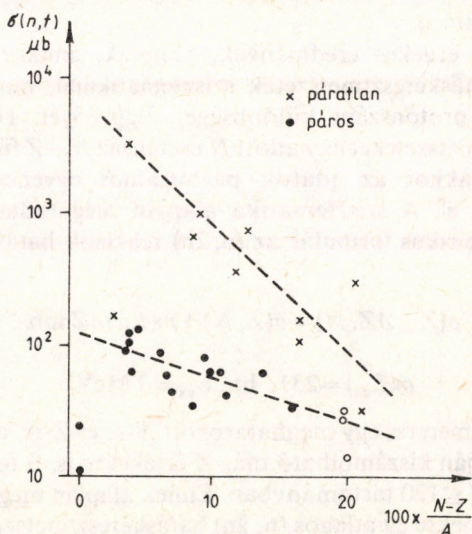
Debrecenben a Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén Csikai Gyula akadémikus vezetése alatt dolgozik hosszú ideje egy lelkes csoport, amelynek több neutrongenerátor áll rendelkezésére. Ezek egy részét saját maguk építették, más részét importálták. A debreceni iskola komoly tradíciókra tekinthet vissza, széles körű tevékenységének és aktivitásának részletes ismertetése meghaladja ezen előadás kereteit.

1. Egyik tevékenységi területük a gyorsneutron-reakciók hatáskeresztmetszetének mérése, gyűjtése és feldolgozása, az adatokban levő tendenciák feltárása és értelmezése. E téma keretében vizsgálták az atommag sugár  $A^{1/3}$ -függését és ebben finomszerkezetet találtak. A töltéssugarak átfogó rendezése azt mutatja, hogy van egy durva  $A^{1/3}$ -szerű tömegszámfüggés, és az ettől való eltérés egyszerű szabályszerűséget követ. Ez, leegyszerűsítve, a proton héjszerkezetének a hatását tükrözi, legalábbis a  $Z=28, 50$  és  $82$  protonszámoknál (1. ábra). A könnyű magok esetében az  $A^{1/3}$ -függéstől jelentős eltérések tapasztalhatók, de ezek nem követik ezt az egyszerű sémát. 700 páros magnál a Hartree—Fock—DCS-módszerrel végzett számítások eredményeit a kísérleti adatokkal összehasonlították és azt kapták, hogy az elméleti modell jól reprodukálja a töltéssugár átlagos tömegszámfüggését, de nem mutatja a neutronhéjfüggést, holott a számított neutroneloszlás héjszerkezetet mutat. Ebből arra lehet következtetni, hogy az elméleti számításokban egy olyan kölcsönhatást is figyelembe kell venni, amely a valencianeutronok és a protontörzs közötti „polarizációt” írná le. Ezt a munkát egy Orsay-i csoporttal együttműködésben végezték. Kimutatták, hogy könnyű magok esetén egyértelmű kapcsolat van a nukleonok átlagos kötési energiája és az atommag sugara között.

2. Vizsgálták az aktivációs hatáskeresztmetszeteket, és lényegesen tökéletesítették a mérési metodikát, ami ezen a területen



1. ábra.  $r_0 A^{1/3}$ -nal osztott négyzetes-közepes töltéssugarak ( $\rho$ ) néhány elem izotópsorozatára. Jól látható az  $N=50$  mágikus neutronszám hatása. Hasonló jelenség figyelhető meg az  $N=28, 82$  és  $126$  neutronszámot tartalmazó izotópsorozatok esetében is



2. ábra. A  $(n, t)$  reakciók hatáskeresztmetszete az  $(N-Z)/A$  függvényében  $14$  MeV neutronenergiánál



különösen fontos. A mérési metodika tökéletesítése során magyarázatot találtak arra, hogy miért szórnak az irodalomban található aktivációs módszerrel mért hatáskeresztmetszet-értékek. Módszert dolgoztak ki a neutronenergia meghatározására.

3. Vizsgálták az  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, \gamma)$  és  $(n, 2n)$  reakciók hatáskeresztmetszetét aktivációs módszerrel a 13,5—14,8 MeV neutronenergia-tartományban, az obnyinszki intézettel együttműködésben, főleg a fúziós és gyorsreaktorok szerkezeti anyagaira.

4. A trícium béta-aktivitásának mérése révén meghatározták különböző magok esetében az  $(n, t)$  reakciók hatáskeresztmetszetét. Megállapították, hogy az adatokban erős páros-páratlan függés jelentkezik (2. ábra).

5. Kimutatták az  $(n, {}^3\text{He})$  és az  $(n, 2p)$  reakciók létrejöttét.

6. Vizsgálták a gyors neutronok által létrehozott maghasadásban keletkező termékek tömeg-, töltés- és szögeloszlását. A tömegeloszlásra kidolgozott gamma-spektroszkópiai módszerüket az Argonne National Laboratory munkatársaival együttműködve eredményesen alkalmazták urán esetén az energiafüggés meghatározására (3. ábra).

7. Nagyon érdekes eredményeket kaptak, amikor megnézték az  $(n, 2n)$  hatáskeresztmetszetek szisztematikáját, mint az  $N-Z$  (neutron és protonszám különbsége) függvényét. Ha ezeket a hatáskeresztmetszeteket egy adott  $N$  esetén, az  $N-Z$  függvényében ábrázolták, akkor az adatok párhuzamos egyenesek mentén helyezkedtek el. A szisztematika alapján meg tudtak adni egy egyszerű empirikus formulát az  $(n, 2n)$  reakciók hatáskeresztmetszetére:

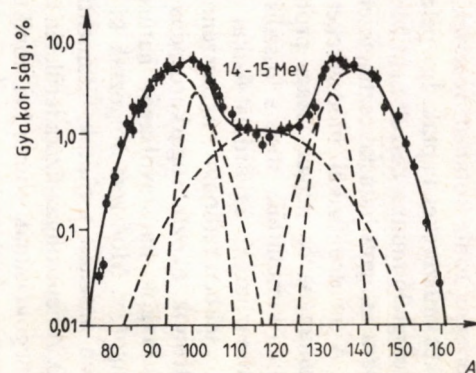
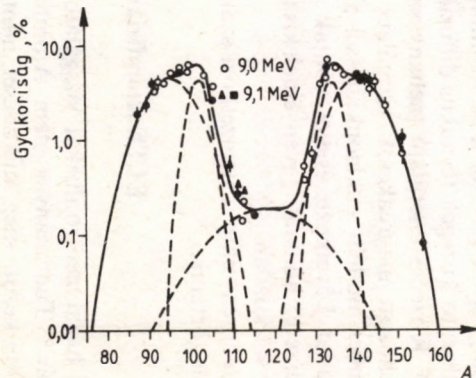
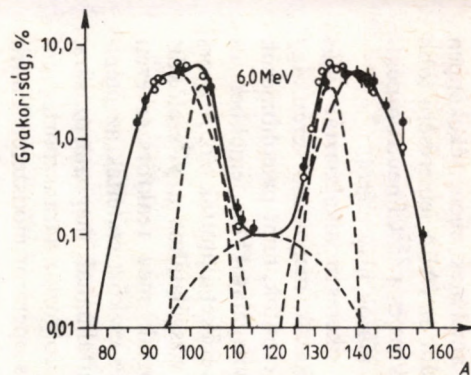
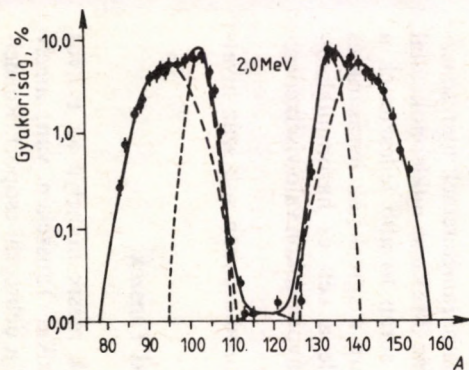
$$\sigma(Z \pm \Delta Z, N) = \sigma(Z, N) \pm m(E_{\text{ex}})\Delta Z \text{ mb,}$$

ahol

$$m(E_{\text{ex}}) = 231, \text{ ha } E_{\text{ex}} = 3 \text{ MeV.}$$

Ha  $\sigma(N, Z)$  ismeretes egy meghatározott  $N$ -re és  $Z$ -re, akkor a fenti formula alapján kiszámolható más  $Z$  értékekre is. E formula érvényes a  $30 \leq N \leq 120$  tartományban. Ennek alapján megadták a természetes elemekre az átlagos  $(n, 2n)$  hatáskeresztmetszet-értékeket.

8. A debreceni iskolának nagyon szoros kapcsolatai vannak a bécsi Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel (IAEA), és ennek



3. ábra. Az  $^{238}\text{U}(n, f)$  folyamatban keletkező termékek tömegeloszlása a bombázó neutron energiájának függvényében. A tömegeloszlást félempirikusan az ábrán szaggatott vonallal jelzett öt Gauss-függvény szuperpozíciója írja le



felkérésére több kutatást végeztek, amelynek ellenértékeképpen értékes műszereket kaptak. Így például az IAEA felkérésére több összefoglaló munka készült a 14 MeV-os és a  $^{252}\text{Cf}$  neutronspektrumára átlagolt hatáskeresztmetszet-adatok helyzetéről.

9. A neutronfizikai módszereket sikeresen alkalmazták más tudományos és népgazdasági problémák megoldása terén. Így például kimutatták, hogy a fosszilis csontok, mint paleohőmérők alkalmazhatók. Szilárdtest-fizikai vizsgálatokhoz fémekben és ötvözetekben radioaktív nyomszennyezőket állítottak elő. A gyors neutronok okozta sugárkárosodás vizsgálatához a visszalökött atommagok hatótávolságát határozták meg reaktorszerkezeti anyagokra. Módszert dolgoztak ki és eszközt építettek az útépítésben használt aszfaltok bitumentartalmának meghatározására.

10. A neutrongáz-fizika területén kidolgozták a transzportegyenlet megoldásának gömbi harmonikus operátor módszerét. Ennek alkalmazásával explicit megoldást adtak anizotróp pontforrás terére P3-közelítésben, továbbá kidolgozták a többdimenziós problémák tárgyalására alkalmas PN—DPN-közelítési peremfeltételeket.

Vizsgálatok folynak a neutronimpulzus-módszer kifejlesztésére nemlassító közegek termikus diffúziós paramétereinek méréséhez.

11. Közepes energiájú (néhány száz MeV-os) nukleonok által létrehozott magreakciók vizsgálata során tovább fejlesztették a Glauber-modellt nukleonkiütéssel járó magreakciók leírására, és egyúttal következtetéseket vontak le a két- és háromnukleon-rendszerek hullámfüggvényeinek kis távolságokon való viselkedésére vonatkozóan.

Eredményeikre a nemzetközi szakirodalomban sok száz hivatkozás történik.

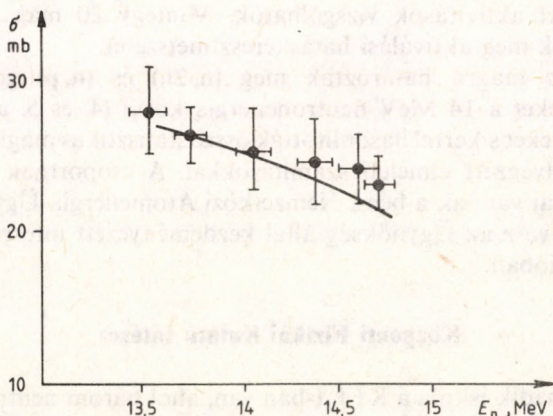
### **ELTE Atomfizikai Tanszék**

A hazai neutronfizikai vizsgálatok másik műhelye az Eötvös Loránd Tudományegyetem Atomfizikai Tanszékén van, amely később kezdte meg működését, mint a debreceni csoport. Rendelkezésükre áll két neutrongenerátor, amelyek gyors neutron repülési idő spektrométerrel és automatikus mérőrendszerrel vannak ellátva. Néhány téma az elmúlt évtized kísérleteiből:

1. 14 MeV-os gyors neutronokkal gerjesztett rövid ( $10^{-7}$ — $10^{-8}$  s) felezési idejű izomer állapotokat vizsgáltak. Meghatároztak több hatáskeresztmetszet-értéket, amelyek nem voltak ismeretesek az irodalomban, néhányat pedig pontosítottak. Az eredményekből a lezajló folyamatok mechanizmusára következtettek.

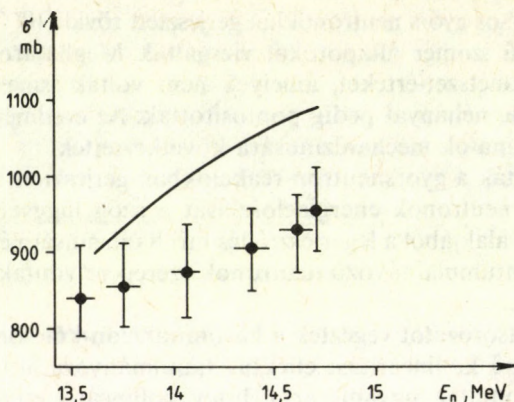
2. Vizsgálták a gyorsneutron-reakciókban gerjesztett magokból kibocsátott neutronok energiaeloszlását a szög függvényében. A spektrumok alakjából a legerjesztődés mechanizmusára és a magas pályamomentummal távozó neutronok szerepére vontak le következtetéseket.

3. Kísérletsorozatot végeztek a háromnukleon-kölcsönhatásban esetleg fellépő kollinearitási effektus tanulmányozására. Elméleti számítások utaltak ugyanis arra, hogy kollinearás esetben (amikor tömegközépponti rendszerből nézve az egyik nukleon nyugalomban marad) a gyors neutronokkal kiváltott deuteronfelhasadás hatáskeresztmetszete jelentősen megnő más kinematikai esetekhez képest. A kísérleti eredmények arra utalnak, hogy ilyen hatáskeresztmetszet-növekedés nincsen, ami egyértelműen a kísérleti vizsgálatokat kiváltó elméleti számítások hiányosságaira utal.



4. ábra. A  $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$  magreakció gerjesztési függvénye 14 MeV körüli neutronenergia-tartományban. A kihúzott görbe a Hauser—Feschbach-elmélet alapján számolt (illesztett paramétert nem tartalmazó) görbe





5. ábra. A  $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$  magreakció gerjesztési függvénye 14 MeV körüli neutronenergia-tartományban. A kihúzott görbe a Hauser—Feshbach-elmélet alapján számolt (illesztett paramétert nem tartalmazó) görbe

4. Kifejlesztettek egy számítógéppel vezérelt besugárzó—gyors mintatovábbító, aktivációs analízisre is alkalmas mérőrendszert, amellyel 0,1 s nagyságú felezési idejű 14 MeV-os neutronokkal létrehozott aktivitások vizsgálhatók. Mintegy 20 mag esetében határoztak meg aktiválási hatáskeresztmetszetet.

5. Több magra határoztak meg  $(n, 2n)$  és  $(n, p)$  gerjesztési függvényeket a 14 MeV neutronenergia körül (4. és 5. ábra). Az eredményeket sikerrel hasonlították össze statisztikus magmodellek alapján elvégzett elméleti számításokkal. A csoportnak intenzív kapcsolatai vannak a bécsi Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel, részt vesz az Ügynökség által kezdeményezett interregionális kooperációban.

### Központi Fizikai Kutató Intézet

A harmadik iskola a KFKI-ban van, ahol három neutronforrás áll rendelkezésre: reaktor, neutrongenerátor és spontán hasadó kalifornium. Az itthoni lehetőséget kiegészítették külföldi kooperációval.

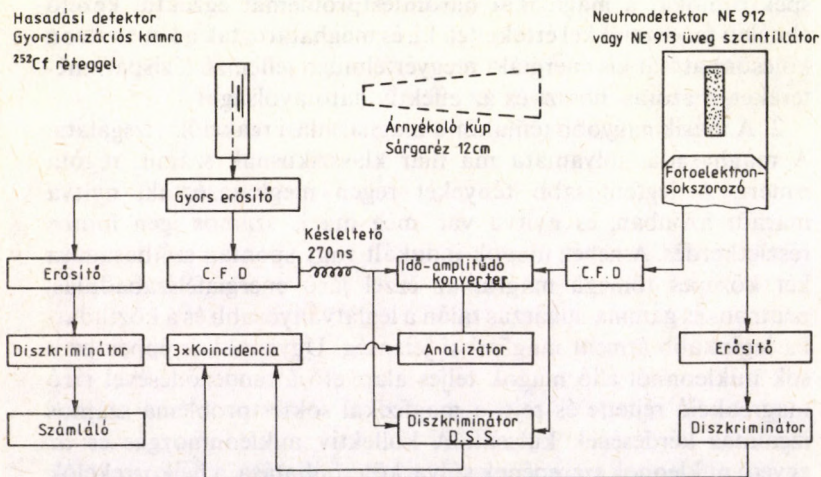
1. Ismeretes, hogy a természetben nem léteznek csak neutronokból álló stabilis magok. Így, ha a magon belüli neutron—neutron kölcsönhatást kívánjuk vizsgálni, akkor közvetlen szórás kísérlet nem végezhető el; tiszta neutroncél tárgy nem létezik. Csak olyan magreakcióval kaphatunk erre vonatkozóan információkat, ahol a végállapotban egyidejűleg két neutron lép ki. Bár az elmúlt évtizedben több tucat ilyen mérést végeztek világszerte, ezek pontossága, illetőleg megbízhatósága nem volt elegendő ahhoz, hogy az eredményekből egyértelmű következtetést lehessen levonni a magerők bizonyos alapvető tulajdonságaira, például a töltésfüggetlenségre, illetve a töltésszimmetriára vonatkozóan. Ezért a KFKI-ban új módszert dolgoztak ki, amelyben a neutron-deutérium felbomlásban kilépő proton és az egyik neutron energiájának egyidejű mérésével meghatározták a folyamat differenciális hatáskeresztmetszetét. A specifikus kísérleti feltételek lehetővé tették a hatáskeresztmetszeteknek az eddiginél lényegesen nagyobb tartományában, tisztább körülmények közötti mérését. Ezt a mérést neutrongenerátorral végezték, amelyhez on-line számítógép csatlakozott, és így sokparaméteres mérést lehetett megvalósítani. A mért spektrumokat a magfizikai háromtestproblémát egzaktul kezelő elméleti módszerekkel értékelték ki, és meghatározták a két neutron kölcsönhatását kis energiákon egyértelműen jellemző fázisparamétereket, a szórási hosszt és az effektív hatótávolságot.

2. A másik nagyobb témakör a maghasadási reakciók vizsgálata. A maghasadás folyamata ma már klasszikusnak számít, régóta ismert. A legfontosabb tényeket régen meghatározták, nyitva maradt azonban, és nyitva van még ma is számos igen fontos részletkérdés. A nehéz magok indukált vagy spontán széthasadása két közepes tömegű magra, az ezzel járó energiafelszabadulás, neutron- és gamma-sugárzás talán a leglátványosabb és a köztudatba leginkább átment magfizikai jelenség. Ugyanakkor éppen ez a sok nukleonból álló magok teljes alapvető átrendeződésével járó magreakció rejtette és rejtje a magfizikai soktestprobléma számos izgalmas kérdésének kulcsát. A kollektív nukleonmozgás és az egyedi nukleonok szerepének súlya, kölcsönhatása, a héjkorrekciók fontosságának megismerése igen sok addig megmagyarázhatatlan jelenséget értelmezett, és a maghasadási kutatások a 70-es évek



magfizikájának egyik legvirágzóbb fejezetévé váltak az egész világon.

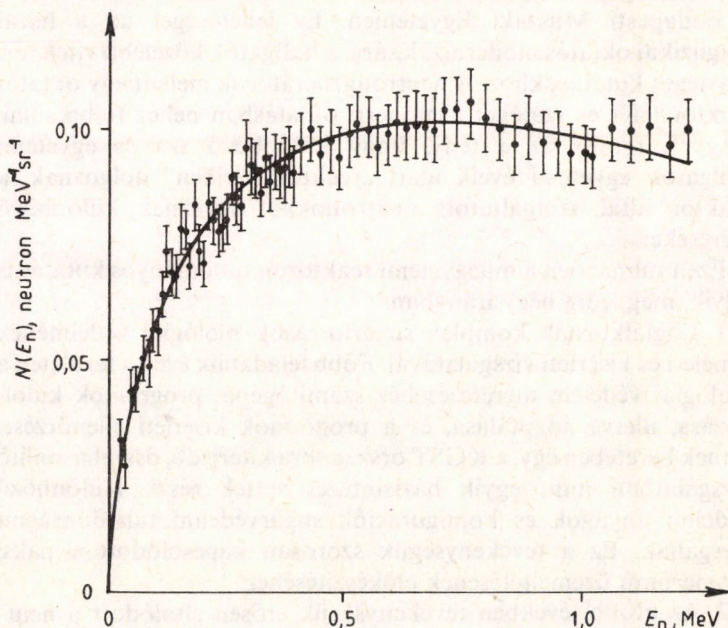
A KFKI-ban a hasadási neutronok és gamma-emissziók vizsgálatának kettős célja volt. Az egyik a hasadási mechanizmusra vonatkozó információk, hisz a neutronok kibocsátása a szétszakadásban keletkező magok gerjesztettségi állapotát, a rendelkezésre álló energia megoszlását tükrözi a rendszer különböző szabadsági fokai között. A gamma-sugárzás vizsgálatából pedig elsősorban a fennálló impulzuszórási viszonyokra következtethetünk. A másik nem kevésbé fontos cél magfizikai adatok mérése. A reaktorokban a hasadásnál keletkező neutronok energiaszórásának ismerete a reaktortervezés egyik alapköve, ugyanakkor az alap maghasadási reakciók során keletkező neutronok energiaszórását 0,5 MeV alatti energiatartományban csak extrapolációval becsülték, pontos adatok nem álltak rendelkezésre. Ezt a tényt olyan mérés-technikai nehézségek magyarázzák, mint az ilyen energiájú neutron detektálási határfokának, s a szórás-effektusok kellően pontos figyelembevételének nehézségei. Az irodalomban megjelent



6. ábra. Kísérleti elrendezés alacsony energiájú hasadási neutronspektrumok repülési idő módszerrel történő méréséhez

kísérletek ellentmondásai, egyes mérések anomális, ún. retardált neutronok létezésére utaló eredményei érthetetlen kérdőjeleket jelentettek.

A KFKI-s mérések, amelyeket különösen kiélezett detektálási körülmények segítségével végeztek, az obnyinszki intézettel együttműködésben kimutatták, hogy retardált neutronok nem léteznek. A hasadási neutronok energiaeloszlásának mérésére végzett szisztematikus mérési sorozatok (6. ábra) a termikus neutronok hatására történő hasadásra vonatkozóan szolgáltatott megbízható adatokat (7. ábra). A mérésekkel kapcsolatban olyan kérdésekre is választ kerestek, hogy az éppen széthasadó magok között hogyan oszlik meg a rendelkezésre álló energia, milyenek ezen nukleáris rendszer termodinamikai tulajdonságai, hogyan alakulnak az impulzusmomentum-viszonyok, milyen a folyamat



7. ábra.  $^{232}\text{Cf}$  spontán hasadásával keletkező neutronok energiaspektruma az alacsony energiájú tartományban. A kihúzott görbe a Maxwell-eloszlásnak felel meg



dinamizmusa. A neutronspektrum adatai megerősítették a széthasadás pillanatában feltételezett termikus egyensúly alapján kidolgozott elméleti modellt, ugyanakkor a neutronspektrumok alacsonyenergiás részéből bizonyos, a széthasadásnál kialakuló, eddig nem várt impulzuszórázat-összetevők hatására is lehetett következni.

A termikus neutronokkal bombázott urán-235 magokból kialakuló urán-236 magokban a gamma-sugárzás kibocsátása utáni, már lassúbb spontán izomerhasadás hatáskeresztmetszetét is meghatározták.

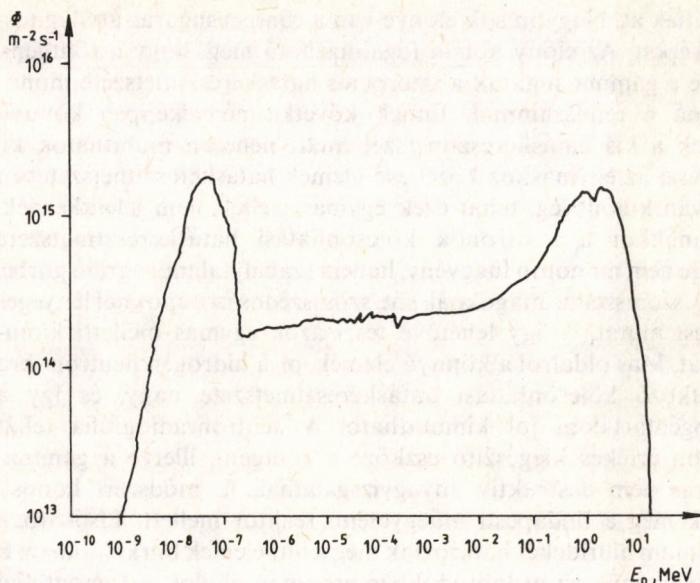
### **BME Tanreaktor**

Mint ismeretes, hazánkban a csillebérci kutatóreaktoron kívül később megépült egy másik reaktor is, elsősorban oktatási célokkal a Budapesti Műszaki Egyetemen. Ez lehetőséget ad a hazai magfizikai oktatás modernizálására, a hallgatók közelebb vitelére a tényleges kutatásokhoz. A neutrongenerátorok mellett egy oktatóreaktor létét és szerepét a modern oktatásban nehéz túlbecsülni. Nagyon fontos az a tény, hogy különböző szakos egyetemi hallgatók egyetemi éveik alatt „reaktorközelben” dolgoznak, a reaktor által szolgáltatott neutronokkal végeznek különböző méréseket.

Ezen túlmenően a műegyetemi reaktoron tudományos kutatás is folyik, mégpedig négy irányban:

1. Foglalkoznak komplex sugárforrások biológiai védelmének elméleti és kísérleti vizsgálatával. Főbb feladataik ezen a területen a biológiai védelem méretezéséhez számítógépes programok kidolgozása, illetve adaptálása, és a programok kísérleti ellenőrzése. Ennek keretében egy, a KGST országokra kiterjedő, összehasonlító vizsgálatban mint egyik bázisintézet vettek részt. Különböző védelmi anyagok és konfigurációk sugárvédelmi tulajdonságait vizsgálják. Ez a tevékenységük szorosan kapcsolódott a paksi atomerőmű üzemeltetésének előkészítéséhez.

2. Az utóbbi években tevékenységük erősen eltolódott a neutronspektrometriára és azzal kapcsolatos alkalmazási területekre. Eredményeket értek el a neutronspektrometria egymást kiegészítő



8. ábra. A tanreaktor D5 zóna-pozíciójában multifólia aktivációs módszerrel meghatározott neutronspektrum [2]

módszereinek kidolgozásában, illetve hazai meghonosításában (pl. az aktivációs módszer multifóliás megoldása, spektrummérés visszalökésen alapuló gáztöltésű szcintillációs számlálóval, félvezető detektorokkal). Ezek eredményeként az egész reaktor neutronspektrumát tudják mérni a 0–12 MeV tartományban (8. ábra). Az eredményeket alkalmazzák neutrondozimetriai és szerkezeti anyagok sugárkárosodásával kapcsolatos kutatásokban. Ez utóbbinál a bécsi Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által összefogott nemzetközi összehasonlító vizsgálatokban vesznek részt, mint a két bázisintézet egyike. E tevékenységnek is van szerepe Pakssal kapcsolatban.

3. Művelői egy nagyon érdekes neutronalkalmazási területnek, a neutronradiográfiának. Ebben a modern anyagvizsgálati módszerben a vizsgálandó mintát (például nagy öntvényeket) neutronokkal



világítják át. Nagyon sok előnye van a röntgensugaras átvilágítás-hoz képest. Az előny abban fogalmazható meg, hogy a röntgen-, illetve a gamma-sugarak abszorpciós hatáskeresztmetszete monoton nő a rendszámmal. Ennek következményeképpen könnyű elemek a kis hatáskeresztmetszet miatt nehezen mutathatók ki, másrészt az egymáshoz közel eső elemek hatáskeresztmetszetében alig van különbség, tehát ezek egymás mellett nem jelentkeznek. Ugyanakkor a neutronok kölcsönhatási hatáskeresztmetszete messze nem monoton függvény, hanem szabálytalanul ugráló görbe, amely szomszédos magoknál, sőt, szomszédos izotópoknál lényeges eltérést mutat, és így lehetővé teszi azok egymás melletti kimutatását. Más oldalról a könnyű elemek, pl. a hidrogén neutronokra vonatkozó kölcsönhatási hatáskeresztmetszete nagy, és így a hidrogéntartalom jól kimutatható. A neutronradiográfia tehát nagyon értékes kiegészítő eszköze a röntgen-, illetve a gamma-sugaras nem destruktív anyagvizsgálatnak. E módszert honosították meg a budapesti műegyetemi reaktor mellett. Elsősorban cirkónium hidrideket határoltak meg a fűtőelemek burkolatában. E tevékenységük az utóbbi időkből erősen eltolódott a tomográfiai módszer alkalmazása felé. Ezt a munkát az IAEA-val kötött szerződés keretében végzik. Az a cél, hogy a módszert alkalmassá tegyék a paksi atomerőmű kiégett fűtőelem-kötegének vizsgálatára.

4. A magfizikai mérés technika alkalmazásában is érték el eredményeket, pl. kifejlesztettek egy neutronabszorpció alapuló bórsavkoncentráció-mérő berendezést. Erre öt szocialista és öt kapitalista országban kaptak szabadalmat. A módszer alkalmazására sor kerül a paksi atomerőműben és a řeži (Csehszlovákia) Atomkutató Intézetben.

### Izotóp Intézet

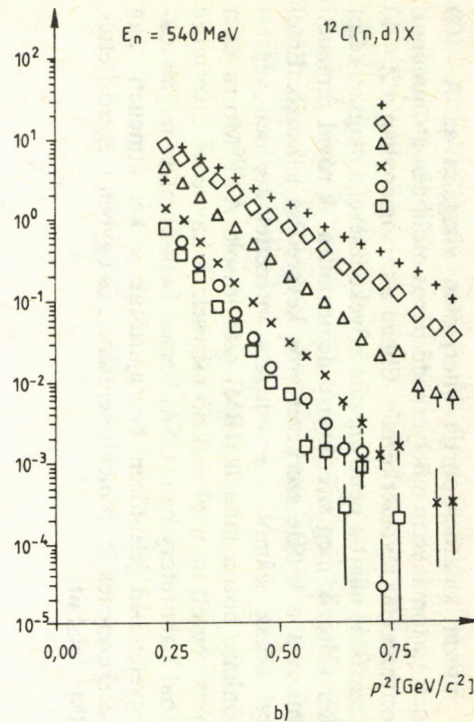
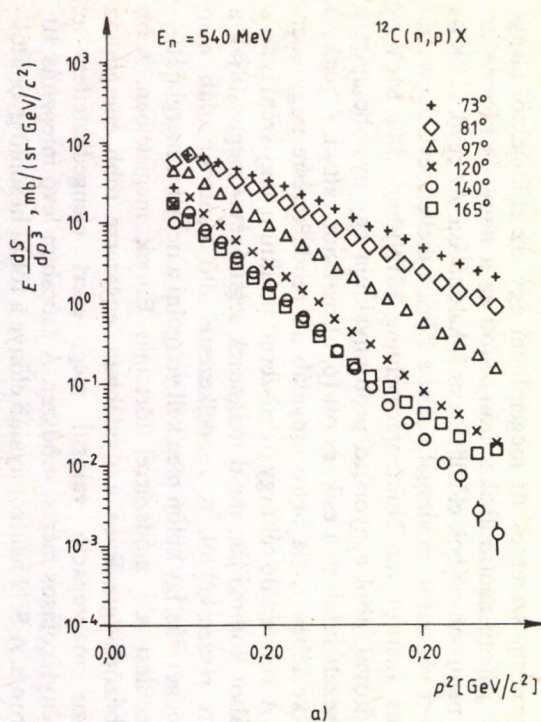
A hetvenes évek végén az Izotóp Intézetben sikerrel alkalmazták a KFKI 5 MW-os kutatóreaktorát gyorsneutron-forrásként mag-spektroszkópiai vizsgálatok céljaira. A moszkvai Kurcsatov Intézetrel együttműködésben bevezetett  $(n, n' \gamma)$  reakció módszer egyesíti magában a neutronos gerjesztés és a gamma-spektroszkópiai módszer előnyeit.

Az intézet kutatócsoportja kiterjedten vizsgálta az  $A \sim 100$  átmeneti tartományban elhelyezkedő páros molibdén-atommagok alacsonyenergiás nívószerkezetét. Ebben a tartományban a  $Z = 40$  alhéljlezáródás miatt a neutronszám növekedésével a magszerkezet hirtelen változik meg szférikusról deformáltra. A rövid átmeneti tartományra a kétféle szerkezet erős keveredése jellemző. Erről sikerrel adtak számot a groningeri intézettel közösen végzett kölcsönható-bozon modell (IBM) számítások. A  $^{100}\text{Mo}$ -ra és a  $^{98}\text{Mo}$ -ra végzett  $(n, n' \gamma)$  reakció mérések, a Lawrence Livermore National Laboratory-ban (USA) készült béta-bomlás vizsgálatokkal egyetemben jelentősen hozzájárultak e két átmeneti mag nívószerkezetének jobb megismeréséhez, és egyben megerősítették az IBM jóslatait.

### Nagyenergiájú neutronfizikai vizsgálatok

Végezetül szeretnék itt megemlíteni egy, az előbbiektől eléggé eltérő jellegű neutronfizikai irányzatot; ez a nagy- és középenergiájú neutronnyalábok előállítása és felhasználása. Az egyik KFKI-csoport végzett ilyen vizsgálatokat a Zürich mellett levő Schweizerisches Institut für Nukleonforschung (SIN)-ban, 589 MeV-os gyorsítóval, ahol a gyorsító protonnyalábja egy nyalábcspadára elhelyezett céltárgyra esik, és ott  $(p, n)$  reakciót vált ki. A reakció következtében tiszta neutronnyaláb áll rendelkezésre nagy energián. A konvertáló céltárgy (rendszerint berillium vagy szén) után a nyalábot kollimálják, majd mágnesek segítségével megtisztítják a töltött részecskéktől. A rendelkezésre álló neutronnyaláb nem monoenergiás, így külön meg kell vizsgálni a neutron energiáját, — ez repülési idő módszerrel történik. Ennek megfelelően, több bombázóenergia lévén a nyalábban, egyszerre több energiához tartozó magreakció valósul meg, ezért elengedhetetlen az eseménytárolásos mérési módszer. A csúcspanelű intenzitás  $10^7$  neutron/s. A SIN neutronnyaláb előnye a többi hasonló gyorsítónál levő nyalábokhoz képest, hogy folyamatos üzemű és a mérőcsarnokban a nyalábtól fél méterre a háttér gyakorlatilag már csak a kozmikus sugárzás.





9. ábra. Szénmagokból 540 MeV energiájú neutronok hatására kilépő töltött részecskék spektrumai különböző szögekben mérve: a) protonspektrumok, b) deuteronspektrumok

Jelenleg a közepes energiájú magfizikában az egyik érdekes és ma még elméletileg nem tisztázott terület a kumulatív részecskék vizsgálata. Eddig protonnyalábnál figyelték meg a hátraszögben  $150\text{--}180^\circ$  alatt keletkező  $\pi$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $t$  részecskéket, amelyekre a hatáskeresztmetszet jóval nagyobb, mint azt az eddigi modellekből várnánk. Ilyen méréseket ez a csoport is végzett Dubnában. Nagyon érdekes a reakciók töltésinvarianciája szempontjából a semleges nyalábbal végzett kísérlet. Ezt a magyar csoport javaslatára a SIN gyorsítón indították meg a freyburgi egyetem (NSZK) egy csoportjával közösen. A KFKI szcintillációs teleszkópjával detektálják a  $150^\circ$ -os szög alatt kilépő töltött részecskéket, és az energia, valamint a repülési idő méréseivel azonosítják őket. A német csoport PDP-11/45 számítógépet szolgáltat a méréshez. A szcintillációs detektorral való méréssel párhuzamosan a német csoport mágneses spektrométert is állított a nyalábbba, és ez lehetőséget ad a pozitív és negatív pionok szétválasztására, ami szcintillációs módszerrel nem lehetséges. A mérés feldolgozását a KFKI-ban végzik. Az előzetes mérési eredmények a 9. ábrán láthatók. Mind a protonok (a), mind a deuteronok (b) spektruma exponenciális alakú, és úgy tűnik, hogy az (n, p) hátraszórás hatáskeresztmetszete közel megegyezik a (p, p) szórás hatáskeresztmetszetével, legalábbis C-céltárgy esetén.

## Irodalom

### KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék

1. I. ANGELI—J. CSIKAI—I. HUNYADI: Phys. Letters **29B** (1969) 36.
2. H. PRADÉ—J. CSIKAI: Nucl. Phys. **A123** (1969) 365.
3. I. ANGELI—J. CSIKAI: Nucl. Phys. **A158** (1970) 389.
4. I. ANGELI—J. CSIKAI: Nucl. Phys. **A170** (1971) 577.
5. J. CSIKAI: At. En. Rev. **11** (1973) 415.
6. I. ANGELI—J. CSIKAI—P. NAGY: Nucl. Sci. and Engin. **55** (1974) 418.
7. A. DEMÉNY—K. M. DEDE—K. ERDEI: Nucl. Sci. and Engin. **61** (1976) 534.
8. K. M. DEDE: Atomkernenergie **28** (1976) 93.
9. J. CSIKAI—Z. DEZSŐ: Nuclear Energy **3** (1976) 527.
10. I. ANGELI—M. CSATLÓS: Nucl. Phys. **A288** (1977) 480.
11. Cs. M. BUCZKÓ—L. VAS: Nature **269** (1977) 792.



12. M. VÁRNAGY—L. VASVÁRY—E. GYARMATI—S. JUHÁSZ—T. SCHARBERT—T. SZTARICKAI: Nucl. Instr. Meth. **141** (1977) 489.
13. S. NAGY—K. F. FLYNN—J. E. GLINDER—J. W. MEADOWS—L. E. GLENDENIN: Phys. Rev. **C17** (1978) 163.
14. S. DARÓCZY—S. NAGY—P. RAICS—L. KÖVÉR—I. HAMVAS: Second Advisory Group Meeting on Fission Product Nuclear Data. 5—9. Sept. 1977. Petten. Proc. IAEA-213, Vienna, 1978.
15. I. ANGELI: Phys. Letters **B82** (1979) 313.
16. S. SUDÁR—J. CSIKAI: Nucl. Phys. **A319** (1979) 157.
17. I. ANGELI—M. BEINER—R. J. LOMBARD—D. MAS: Journal of Physics G: Nucl. Phys. **6** (1980) 303.
18. Н. В. КОРНИЛОВ—Б. В. ЖУРАВЛЕВ—О. А. САЛЬНИКОВ—Ш. НАДЬ—Ш. ДАРОЦИ—Й. ЧИКАИ: Атомная энергия **49** (1980) 283.
19. J. CSIKAI: in Proc. of the Interregional Advanced Training Course on Applications of Nuclear Theory to Nuclear Data Calculations for Reactor Design, Nuclear Theor. for Applications. 1981. Trieste, p. 215.
20. К. САЙЛЕР—Е. И. ИСМАТОВ—В. К. ТАРТАКОВСКИЙ—В. И. ШУЛЬГА: Вестник Киевского Госуниверситета, Физика **22** (1981) 67.
21. К. САЙЛЕР—В. К. ТАРТАКОВСКИЙ: УФЖ **26** (1981) 1414.
22. Е. Б. ДЕВКИН—К. Г. САЙЛЕР—А. Д. ФУРСА: Ядерная физика **36** (1982) 5 (II) 1150.
23. M. VÁRNAGY—J. CSIKAI: in Solid State Nuclear Track Detectors. Ed. P. H. FOWLER et al. Pergamon Press, Oxford, 1982, p. 753.
24. Cs. M. BUCZKÓ—J. CSIKAI—J. NEMESKÉRY: Acta Phys. Acad. Sci. Hung. **53** (1982) p. 165.

### ELTE Atomfizikai Tanszék

1. A. ÁDÁM—Á. KISS—E. MAYER: Nucl. Inst. Meth. **96** (1971) 213.
2. A. ÁDÁM—Á. KISS—D. HORVÁTH—E. MAYER: Nucl. Phys. **A180** (1972) 587.
3. D. HORVÁTH—Á. KISS: Acta Phys. Acad. Sci. Hung. **31** (1972) 327.
4. F. DEÁK—S. GUETH—P. KÁLMÁN—Á. KISS: Acta Phys. Acad. Sci. Hung. **37** (1975) 208.
5. F. DEÁK—S. GUETH—J. INCÉDY—Á. KISS: Acta Phys. Acad. Sci. Hung. **38** (1975) 208.
6. K. BERÉNYI—F. DEÁK—S. GUETH—Á. KISS—Cs. PONGRÁCZ—Cs. SÜKÖSD: Nucleonika **25** (1980) 1109.

### Központi Fizikai Kutató Intézet

1. J. KECSEMETI—T. CZIBÓK—B. ZEITNITZ: Nucl. Phys. **A254** (1975) 110.
2. П. П. ДЯЧЕНКО—А. ЛАЙТАИ: Ядерная Физика **T19** (1974) 1212.
3. Ю. П. ГАНГРСКИЙ—А. ЛАЙТАИ—Б. М. МАРКОВ: Ядерная Физика **T24** (1976) 880.

## BME Tanreaktor

1. É. M. ZSOLNAY—GY. CSOM—E. J. SZONDI: Periodica Politechnica, Electrical Engineering **26**, No. 1—2 (1982).
2. É. M. ZSOLNAY—E. J. SZONDI: Politechnica, Electrical Engineering **26**, No. 1—2 (1982).
3. V. KOVÁCS—E. VIRÁGH—E. KOCSIS—I. GYURJÁN: Acta Biochim. et Biophys. Acad. Sci. Hung. **12** (1977) 49.
4. V. KOVÁCS—I. GYURJÁN—Á. KERESZTES—E. VIRÁGH: Biochim. et Biophys. Acad. Sci. Hung. **14** (1979) 103.
5. W. L. ZIJP—H. J. NOLTHENIUS—É. M. ZSOLNAY—E. J. SZONDI—G. C. H. M. VERHAAG—D. E. CULLEN—C. ERTEK: Status Report on the REAL-80 Exercise. in Proc. of the 4th ASTM-EURATOM Symp. on Reactor Dosimetry, Gaithersburg, 22—26. March, 1982. Report NUREG (CP-0029 Vol. 2.). USA Nuclear Regulatory Commission. Washington, D. C., 1982.
6. F. LÉVAI: Identification of Hydrogen in Zr by resonance detection of neutrons. Report of a fellowship program Cassacchia, Italy, 1975.
7. GY. CSOM—S. DÉSI—S. ÉLŐ—E. SPITKO—B. SZEPESSY—I. SZÜCS: Gerät für die kontinuierliche Messung der Borsäure Konzentration des Druckwasser-Reaktors. Nuclex **75**, 1975. okt. 7—11. Basel.

## Izotóp Intézet

1. M. SAMBATARO—G. MOLNÁR: Nucl. Phys. **A376** (1982) 201.
2. G. MOLNÁR—I. DIÓSZEGI—Á. VERES—M. SAMBATARO: Nucl. Phys. **A403** (1983) 342.
3. R. A. MEYER—J. KIN—G. MOLNÁR—B. FAZEKAS—A. VERES—M. SAMBATARO: Phys. Rev. (in press).

## Nagyenergiájú neutronfizikai vizsgálatok

- J. ERŐ et al.: SIN Newsletter **15** (1983) 46.



# Szilárdtest-fizikai kutatások neutronokkal

Kroó Norbert

MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

Az elmúlt évtizedek gyors ipari fejlődésében meghatározóak voltak azok az új anyagok és technológiai eljárások, amelyeket a szilárdtest-kutatás produkált, amelyek tehát a szilárd testek jobb megismerése alapján jöttek létre. Ezekben a kutatásokban igen nagy szerepet játszottak, és napjainkban is igen fontosak azok a vizsgálati módszerek, amelyek az anyagok szerkezetének, valamint mikrodinamikájának meghatározását teszik lehetővé. Ezek jelentős része különböző típusú sugárzások és az anyag közötti kölcsönhatáson alapul, a sugárzás abszorpciójából, illetve szóródásából következőnek az anyagi jellemzőkre.

A különböző lehetséges sugárzásfajták (elektromágneses, elektron, proton, neutron stb.) között kitüntetett szerepe van a neutronsugárzásnak, különösen a szórás kísérletekben. Ennek oka az, hogy e sugárzásfajta fontos előnyökkel rendelkezik más sugárzástípusokkal szemben:

1. az atomreaktorokból nagy intenzitással nyerhető termikus neutronok hullámhossza összemérhető a szilárd anyag atomjai közötti távolsággal;
2. a termikus neutronok energiaváltozása az olyan rugalmatlan szórási folyamatokban, amelyek során a szilárd testben szokásos gerjesztések keletkeznek vagy szűnnek meg, összemérhető a kezdeti neutronenergiával;
3. a neutronok semleges részecskék és
4. mágneses momentummal rendelkeznek.

Az 1. tulajdonság eredményeként a szilárd test egyes atomjairól szórt neutronhullámok egymással interferálhatnak, ami szerkezetmeghatározást tesz lehetővé, míg a 2. miatt lehetséges a szilárd testek elemi gerjesztései spektrumának érzékeny meghatározása. 3. miatt a neutronok mélyen behatolhatnak az anyagba, és annak egész térfogatáról adnak információt. Végül a neutronokat mágneses momentumuk (4.) érzékeny eszközzé teszi a mágneses anyagok szerkezetének és dinamikájának meghatározására.

E kétségtelen előnyök mellett a neutronszórás-kísérletek nagy hátránya költségességük. Ezért csak azon problémák megoldása célszerű ilyen úton, amelyek más, olcsóbb módszerekkel csak nehezen vagy egyáltalán nem oldhatók meg. Ezek között a neutron mágneses momentuma miatt kiemelkedő szerepet játszanak a mágneses szerkezet és mikrodinamika meghatározására irányuló mérések. A röntgensugarak hullámhossza is az atomi távolságok nagyságrendjébe esik, és ezért jól használhatók nem mágneses anyagok szerkezetmeghatározására. Mivel azonban ekkor energiájuk 10 keV nagyságrendű, a szilárd testekben lévő  $\mu\text{eV}$  és 100 meV közti energiájú gerjesztések kimutatására csak nehézkesen és korlátozott mértékben alkalmasak. Ezzel szemben látható fény tartományában dolgozó lézerek segítségével végzett szórás-kísérletekből igen sokat megtudhatunk e gerjesztések spektrumáról (átlátszó anyagban) mivel azonban a fény hullámhossza (400–700 nm) nagy az atomi távolsághoz képest, csak a nagyhullámhosszú, makroszkopikus méretű fluktuációk letapogatására alkalmasak.

### A neutronszerzési kísérletek alaptípusai

A neutronszerzési kísérletekben szerzési hatáskeresztmetszeteket határozunk meg. A kétszer differenciális (energiában és térben) hatáskeresztmetszet rugalmatlan része a szilárd test egyrésze- és kollektív gerjesztéseiről, tehát mikrodinamikájáról, rugalmas része pedig szerkezetéről nyújt felvilágosítást. A mérések alapja az a felismerés, hogy az elemi szerzési aktusra teljesül az energia- és impulzusmegmaradási törvény:

$$E_0 - E' = \frac{\hbar^2 k_0^2}{2m} - \frac{\hbar^2 k'^2}{2m} = \hbar\omega, \quad (1)$$



illetve

$$\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}' = \boldsymbol{\kappa} = 2\pi\boldsymbol{\tau} - \mathbf{q} \quad (2)$$

alakban, ahol  $\hbar\omega$  és  $\mathbf{q}$  a gerjesztések energiája, illetve hullámvektora,  $E_0$  és  $\mathbf{k}_0$  a beeső,  $E'$  és  $\mathbf{k}'$  a szórt neutronok energiája, illetve hullámvektora,  $\boldsymbol{\tau}$  pedig a vizsgált kristály reciprokrács-vektora. Koherens szórás esetén mindkét megmaradási törvény teljesül, inkoherens szórás esetén azonban csak az (1) energiamegmaradási törvény. Rugalmas szórás esetén  $\hbar\omega = 0$  és  $\mathbf{q} = 0$ , és ekkor (2) a jól ismert Bragg-feltételt jelenti,  $\boldsymbol{\kappa} = 2\pi\boldsymbol{\tau}$  alakban. Ez az összefüggés  $\boldsymbol{\kappa}$  és  $\boldsymbol{\tau}$  definíciójának ismeretében

$$2d \sin \vartheta/2 = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

alakban írható le, ahol  $\vartheta$  a szóródás szöge,  $d$  a szóró atomi síkok távolsága,  $\lambda$  pedig a neutronok hullámhossza.

Az elmúlt több mint három évtized során két alapvető módszer alakult ki a neutronszórás-kísérletekben, mégpedig az ún. repülési idő mérési és a diffrakciós módszer. Az elsőben például mechanikus szagatókkal az atomreaktorok Maxwell-eloszlású neutronjaiból monokromatikus neutronimpulzusokat állítanak elő. A mintán szórt neutronoknak egyrészt térbeli eloszlását mérik, másrészt energiájukat egy fix repülési út megtételéhez szükséges idő mérésével határozzák meg. A diffrakciós technika esetében mind a mintára eső monokromatikus nyaláb előállítása, mind a szórt neutronok energia szerinti analízise egykristályok segítségével történik a (3) Bragg-feltétel alapján.

A továbbiakban a neutronszerzési technika néhány alapvető lehetőségét mutatjuk be hazai eredményekkel illusztrálva. Mivel tevékenységünk egy jelentős részét a részben rendezett szilárd anyag vizsgálata teszi ki, példáinkat is zömmel erről a területről vesszük.

## Neutrodiffrakció

A rugalmasan és koherensen szórt neutronok térbeli eloszlásában a (3) egyenlet által meghatározott helyeken éles maximumok figyelhetők meg. Ezen ún. Bragg-csúcsok ismeretében meghatározható a vizsgált minta szerkezete. Amorf anyagokban a Bragg-

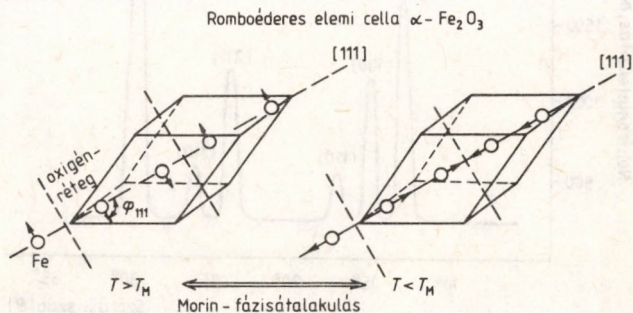
csúcsok elkenődnek. A mért eloszlás Fourier-transzformáltja azonban továbbra is az ún. párkorrelációs függvényt szolgáltatja, amely szemben a kristályos anyag diszkrét eloszlásával folytonos, de maximumokkal rendelkező függvény.

Több olyan eset van, amikor a neutrontdiffrakció előnyben részesítendő a röntgenvizsgálatokkal szemben. Ilyenek:

- a könnyű atomok helyzetének meghatározása, melyekre a röntgensugarak nem érzékenyek;
- két egymáshoz közeli rendszámú atom megkülönböztetése, melyekre a röntgen szórás hatáskeresztmetszete csak kissé tér el;
- a mágneses szerkezetek meghatározása, mely röntgenvizsgálattal nem végezhető el.

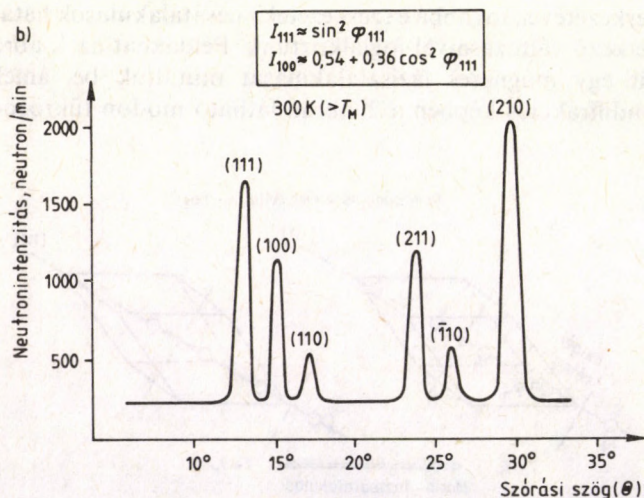
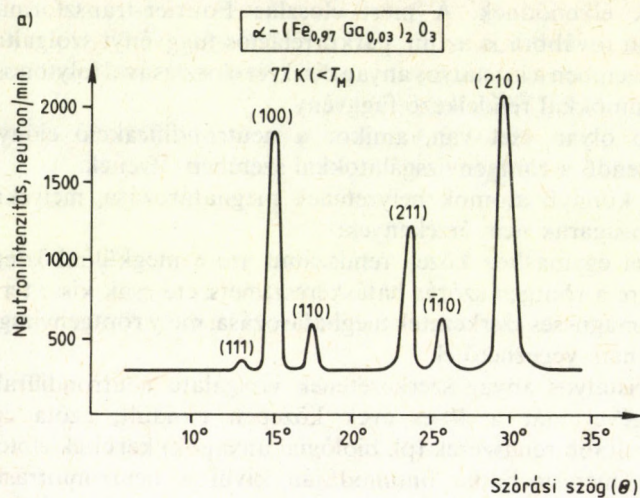
A kristályos anyag szerkezetének vizsgálata neutrontdiffrakció segítségével már a 40-es évek közepén elindult, azóta egyre bonyolultabb rendszerek (pl. biológiai anyagok) kerültek előtérbe, amit a mérés technika finomodásán kívül a neutronforrásként szolgáló atomreaktorok fluxusának növekedése tett lehetővé.

Hazánkban 1960 óta folynak ilyen vizsgálatok. Az első periódusban különböző kristályos mágneses anyagok (elsősorban ötvözetek) szerkezetével, továbbá a szerkezetek fázisátalakulások hatására bekövetkező változásaival foglalkoztunk. Példaként az 1. ábrán a hematit egy mágneses fázisátalakulását mutatjuk be, amely a neutrontdiffrakciós képen a 2. ábrán látható módon tükröződik.

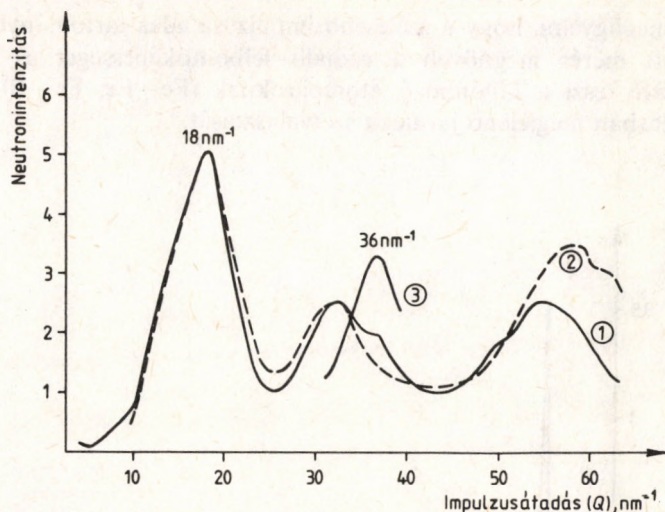


1. ábra. Hematit két különböző mágneses szerkezete. A nyilak a vasatomok mágneses momentumának irányát mutatják





2. ábra. A hematit két különböző mágneses szerkezetéhez tartozó neutrontdiffrakciós görbék



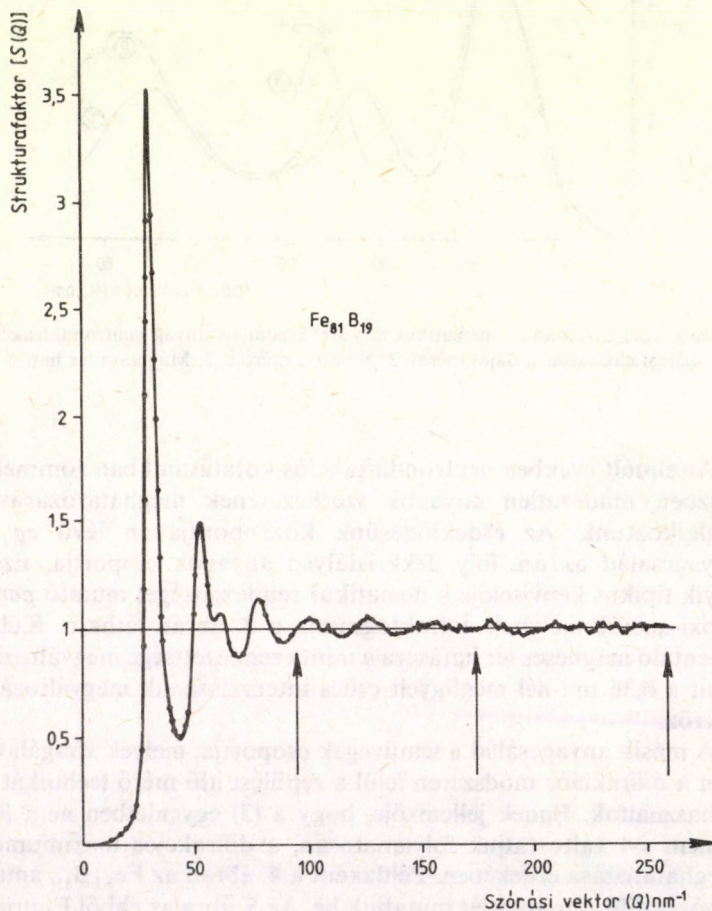
3. ábra. *Para*-azoxi-anizol nematikus folyadékkristályos anyag neutrontdiffrakciós szórási elosztása: 1. Saját mérés, 2. Niimura mérése, 3. Mágneses tér hatása

Az elmúlt években neutrontdiffrakciós kutatásainkban zömmel a részben rendezetlen anyagok szerkezetének meghatározásával foglalkoztunk. Az érdeklődésünk középpontjában lévő egyik anyagcsalád az ún. folyadékkristályos anyagok csoportja. Ezek egyik tipikus képviselője a nematikus rendezettséget mutató *para*-azoxi-anizol, melynek diffraktogramja a 3. ábrán látható. Külső orientáló mágneses tér hatására a minta rendezettsége megváltozik, amit a 0,36 nm-nél megfigyelt csúcs intenzitásának megváltozása tükröz.

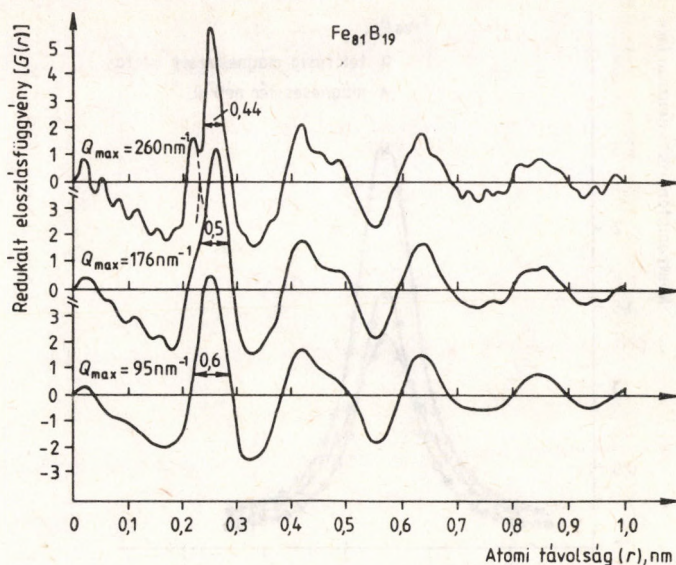
A másik anyagcsalád a fémüvegek csoportja, melyek vizsgálatában a diffrakciós módszeren felül a repülési idő mérő technikát is felhasználtuk. Ennek jellemzője, hogy a (3) egyenletben nem  $\vartheta$ -t, hanem  $\lambda$ -t változtatjuk folyamatosan, a diffrakciós maximumok meghatározása érdekében. Példaként a 4. ábrán az  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{19}$  amorf ötvözet diffraktogramját mutatjuk be. Az 5. ábra az ebből Fourier-transzformációval származtatott eloszlásfüggvényt mutatja. Érde-



mes megfigyelni, hogy a szélesebb impulzusátadás tartományban végzett mérés megnöveli a radiális felbontóképességet és így lehetővé teszi a különböző atompároknak (Fe—Fe, Fe—B) az eloszlásban megjelenő járuléka szétválasztását.



4. ábra.  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{19}$  fémüveg ötvözet neutrondiffrakciós eloszlása



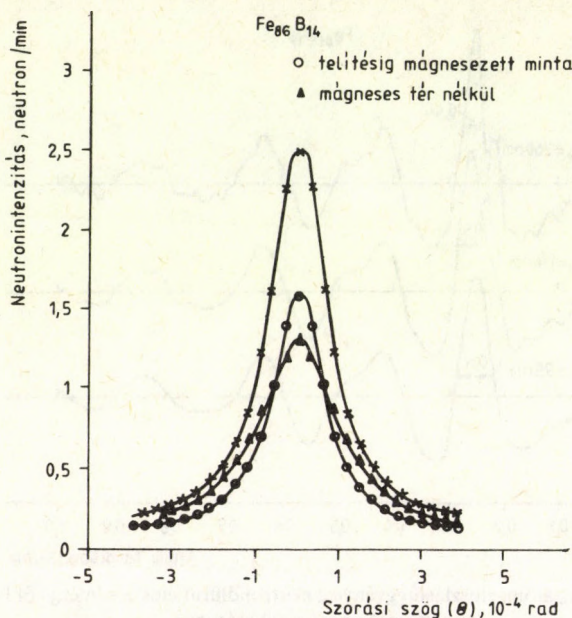
5. ábra.  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{19}$  atomi eloszlásfüggvénye a neutrodiffrakciós eredményből Fourier transzformációval meghatározva

### Kisszögű szórás

Igen nagy rácsállandójú anyagokon fellépő Bragg-szóráson felül a szórási hatáskeresztmetszet-sűrűség bármilyen fluktuációja kisszögű neutronszórásra vezet. E szórás intenzitásának és szög-eloszlásának vizsgálatából ezen inhomogenitások átlagos méretére és számára lehet következtetni.

A neutronszerkezeti módszerek között a kisszögű szórás áll legközelebb a gyakorlati élethez. Fémek és ötvözetek mikrostruktúrájának meghatározása (precipitációs inhomogenitások, diszlokációk, fáradás során fellépő mikropedések, sugárkárosodás stb.), polimer szerkezeti anyagok vagy biológiai anyagok szerkezetének vizsgálata egyaránt lehetséges ezen az úton. Példaként a 6. ábrán egy Fe—B fémüveg mágneses domenjein fellépő kisszögű szórás eloszlását mutatjuk be. Mágneses térben ez az effektus a domenfalak eltűnése miatt megszűnik.



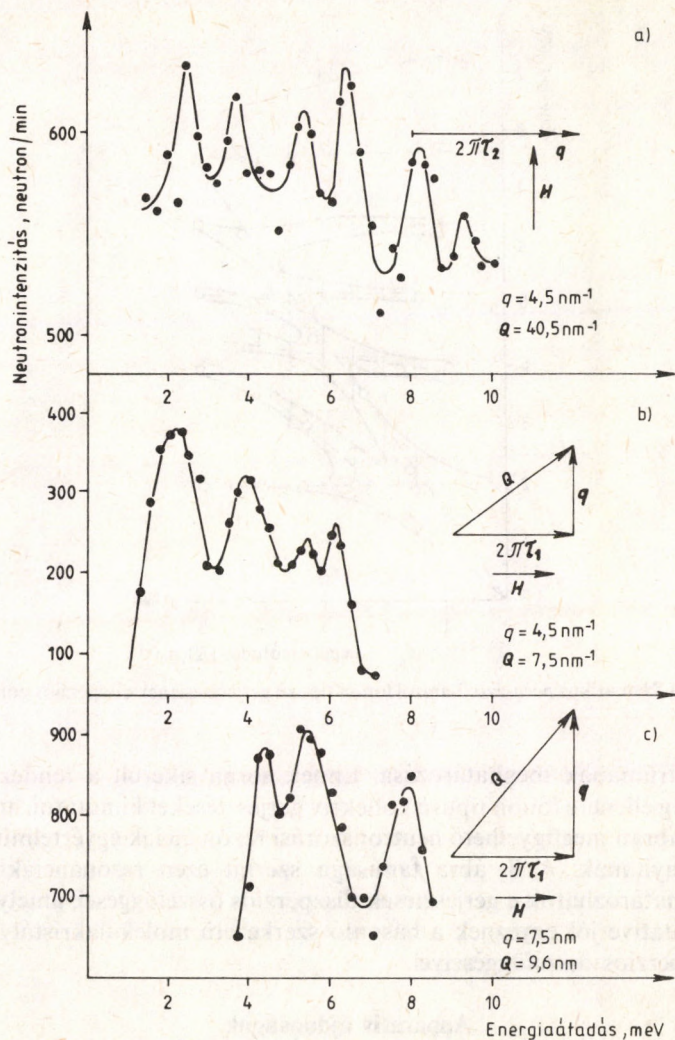


6. ábra.  $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$  fémüvegen végzett kisszögű neutronszerzési kísérlet eredménye. A legnagyobb maximumú görbe a direkt eloszlást írja le

### Rugalmatlan szórás

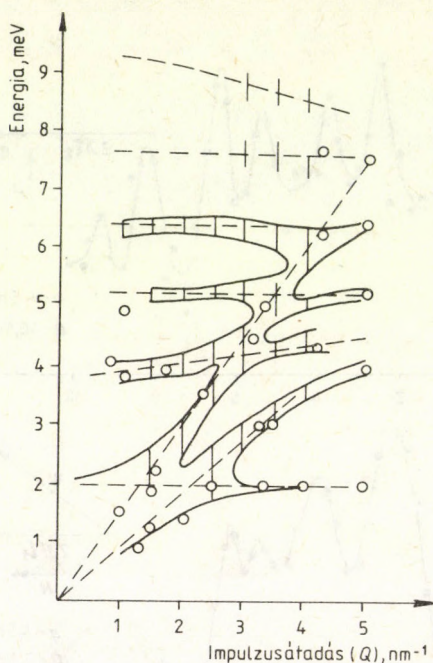
A rugalmatlan neutronszerzés-mérések segítségével az anyag mikrodinamikáját ismerhetjük meg. A koherens szerzésből a kollektív, az inkoherensből pedig az egyrészeske-gerjesztések spektruma meghatározható.

Rugalmatlan szerzési kísérletek az irodalomban az ötvenes évek második felétől ismertek, nálunk az első mérés 1965-ben történt. Eleinte fázisátalakulások és kristályba épített idegen atomok viselkedésének megértése volt a cél. Az utóbbi időben részben rendezett anyagok dinamikáját vizsgáljuk mind a diffrakciós, mind a repülési idő mérő technika felhasználásával. Ezen utóbbi vizsgálatok egy érdekes példája a már említett *para*-azoxi-anizol gerjesztési



7. ábra. Nematikus folyadékkristályos *para*-azoxi-anizolban mért fonon típusú rezonanciák



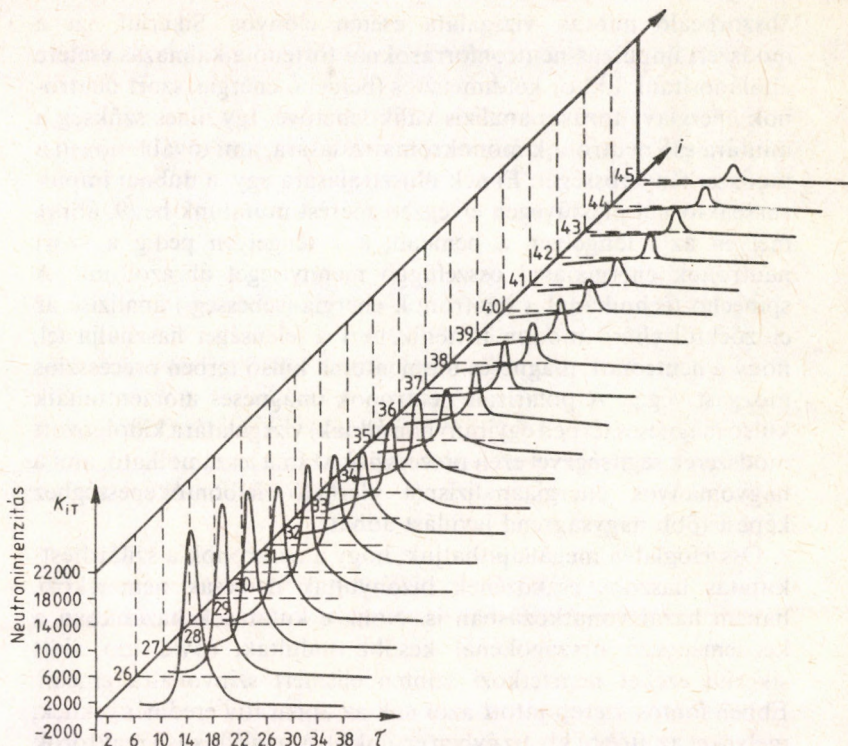


8. ábra. Nematikus *para*-azoxi-anizol fonon típusú gerjesztéseinek diszperziós görbéi

spektrumának meghatározása. Ennek során sikerült a rendezetlenség ellenére fonon típusú kollektív gerjesztéseket kimutatni, amit a 7. ábrán megfigyelhető neutronszerzési rezonanciák egyértelműen bizonyítanak. A 8. ábra tanúsága szerint ezen rezonanciákból meghatározhatók a gerjesztések diszperziós összefüggései, amelyek kvalitatíve jól egyeznek a hasonló szerkezetű molekulakristályok diszperziós összefüggéseivel.

### Apparatív újdonságok

Neutronszerzési kutatásainkban már hosszabb ideje fontos helyet foglalt el az az apparatív tevékenység, melynek során jelentős mértékben hozzájárultunk ezen technika fejlődéséhez. Illusztrá-



9. ábra. Kétdimenziós szórás kép plexiüvegen, korrelációs módszerrel meghatározva a dubnai impulzusreaktornál ( $i$  és  $\tau$  repülési idő, fordítva arányos a mintára eső, illetve szórt neutronok energiájának négyzetgyökével)

cióként a részletek ismertetése nélkül két eredményt mutatunk be. Az első, az ún. korrelációs technika, a reaktorból nyerhető neutronok jobb hatásfokú felhasználását, vagyis a fényerő növelését, míg a második, az ún. neutron spinecho technika, elsősorban a mérések felbontóképességének növelését teszi lehetővé.

A korrelációs technika lényege, hogy a mintára pszeudostatisztikusan modulált neutronnyaláb esik, és a szórt neutronok analízise repülési idő analízissel történik. Alkalmazása különösen erősen



abszorbeáló minták vizsgálata esetén előnyös. Sikertelt ezt a módszert impulzus-neutronforrásoknál történő alkalmazás esetére általánosítani. Ekkor kétdimenziós (bemenő energia, szórt neutronok energiaváltozása) analízis válik lehetővé. Így nincs szükség a mintára eső neutronok monokromatizálására, ami tovább növeli a módszer fényerősségét. Ennek illusztrálására egy, a dubnai impulzusreaktornál plexiüvegen elvégzett mérést mutatunk be (9. ábra), melyen az  $i$  tengelyen a bemenő, a  $\tau$  tengelyen pedig a szórt neutronok energiájával összefüggő mennyiséget ábrázoltunk. A spinecho technikánál a neutronok energia-(sebesség-) analízise az előzőektől eltérő módon történik. Azt a jelenséget használja fel, hogy a neutronok mágneses momentuma külső térben precessziós mozgást végez. A polarizált neutronok (mágneses momentumaik külső mágneses térben egyirányban állnak) vizsgálatára kidolgozott módszerek segítségével ezen precessziók száma leszámolható, ami a hagyományos energiaanalízisnél elérhető felbontóképességhez képest több nagyságrend javulást adhat.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a neutronok a szilárdtest-kutatás hasznos eszközének bizonyultak nemcsak nemzetközi, hanem hazai vonatkozásban is. Noha e kutatások hazánkban a kezdeményező országokénál később indultak, rövid idő alatt sikerült ezeket nemzetközi szinten elismert színvonalra emelni. Ebben fontos szerep jutott azoknak az apparatív eredményeknek, melyeket az utóbbi kb. tíz évben értünk el. A nagy fluxusú reaktorok üzembeállítása után helyzetünk nehezebbé vált. Ezt a hátrányt azonban a nemzetközi kooperáció által nyújtott lehetőségek kihasználásával részben sikerült ellensúlyoznunk. Mindezek figyelembevételével megállapítható, hogy a neutronszerési kísérleteknek a jövőben is helye lesz a hazai szilárdtest-kutatások eszköztárában.

## Irodalom

KROÓ N.: Neutronspektroszkópiai kutatások Magyarországon. A szilárdtest-kutatás újabb eredményei, 3. kötet. Szerk.: SIKLÓS T. Akadémiai Kiadó, Budapest. 1977, p. 184.

KROÓ N.: Fizikai Szemle XXXII (1982) 132.

# Neutronok a biológiában és az orvostudományban

Sztanyik B. László

Országos Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet, Budapest

## Rövid történelmi áttekintés

Ahogy a XIX. század végén a Röntgenről elnevezett sugárzás felfedezését hamarosan követte annak orvostudományi alkalmazása és biológiai hatékonyságának felismerése, ugyanúgy a neutron felfedezése után sem váratott sokáig magára a biológiai hatás megismerését és az orvostudományi hasznosítás elősegítését célzó kutatások megindulása.

A neutron-sugárbiológia öt évtizedes történetének korszakait a következő eseményekkel lehetne jellemezni:

Az első korszak a neutron felfedezésétől az önfenntartó maghasadási láncreakció megvalósításáig tartott. Lawrencenek és Livingstonnak már 1932-ben sikerült intenzív neutronnyalábot előállítania ciklotronban berillium target deuteron-bombázásával [1]. Az első ciklotront további, nagyobb berendezések követték még ugyanabban az évtizedben, köztük egy-egy orvosi és biológiai kutatási célokra szolgáló berendezés is. A két Lawrence és munkatársai 1936-ban tették közzé első közleményeiket a neutron biológiai hatásáról [2, 3]. Locher ugyanabban az évben felvetette a neutronok terápiás hasznosításának gondolatát [4]. Stone, Larkin és mások pedig 1938-ban elkezdték a neutronterápiát, bár 1943-ban kénytelenek voltak felhagyni vele a váratlanul súlyos komplikációk miatt [5].

A második korszak a szinte korlátlan neutronforrást jelentő Fermi-féle atommáglya beindulásától az atombomba bevetéséig terjedt. Az első atommáglyát csakhamar követte az Argonne-i kísérleti, az Oak Ridge-i félüzemi, majd a Hanford-i plutóniumter-



melő atomreaktor. A neutron-sugárbiológiai kutatások a Manhattan-projecthez tartozó University of Rochester és Plutónium-projectek keretében folytak, természetesen titkosan [6].

A harmadik korszak Hiroshima és Nagaszaki atombombázásával, emberi populációk tömeges sugársérülésével vette kezdetét, és folytatódott az atom- és hidrogénfegyverek tökéletesítésére, illetve a fegyverek monopóliumának megszüntetésére irányuló fegyverkezési versenyben. A biológiai kutatások elsősorban az atomrobbanást kísérő sugárzás biológiai hatásainak megismerését tűzték maguk elé. Több, sugaras baleset következett be kritikus rendszerekkel (Los Alamos, Argonne, Szovjetunió).

A negyedik korszak kezdetét az 1955. évi I. Genfi Konferenciától számíthatjuk, amelyen először hangzottak el előadások korábban titkosan kezelt kérdésekről [7]. Az atomfegyverek elleni védekezést szolgáló sugárbiológiai kutatások fokozatosan helyet adtak az atomenergia békés célú hasznosítását elősegítő kutatásoknak. Egymás után alakultak az atomenergia alkalmazását és a sugárzás elleni védelmet koordináló nemzetközi szervezetek: az Egyesült Nemzetek Szervezetének az Atomsugárzás Biológiai Hatásaival foglalkozó Tudományos Bizottsága (UNSCEAR), a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA), a Nemzetközi Sugárzáskutatói Egyesület (IARR); újjászervezték a Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottságot (ICRP) stb. [8—11].

Az évtized közepe táján vette kezdetét hazánkban is az atomenergia alkalmazása. Kutatóintézeteket létesítettek, köztük az OSSKI-t [12], üzembe helyezték a kísérleti atomreaktort, s 1960-ban már magunk is foglalkozni kezdhettünk a neutronok biológiai hatásának vizsgálatával [13—16].

### **A neutronok biológiai hatásának néhány sajátossága**

A sugárbiológiai kutatás célja:

- fundamentális ismeretek szerzése a sugárzás biológiai hatásáról,
- a sugárzás gyakorlati hasznosításának elősegítése,

— a sugárzás ártalmas hatásai elleni védekezés tudományos megalapozása.

E célok eléréséhez kvantitatív összefüggéseket kell megállapítani az objektumban elnyelt sugárzás dózisa és a kiváltott biológiai hatás között [17].

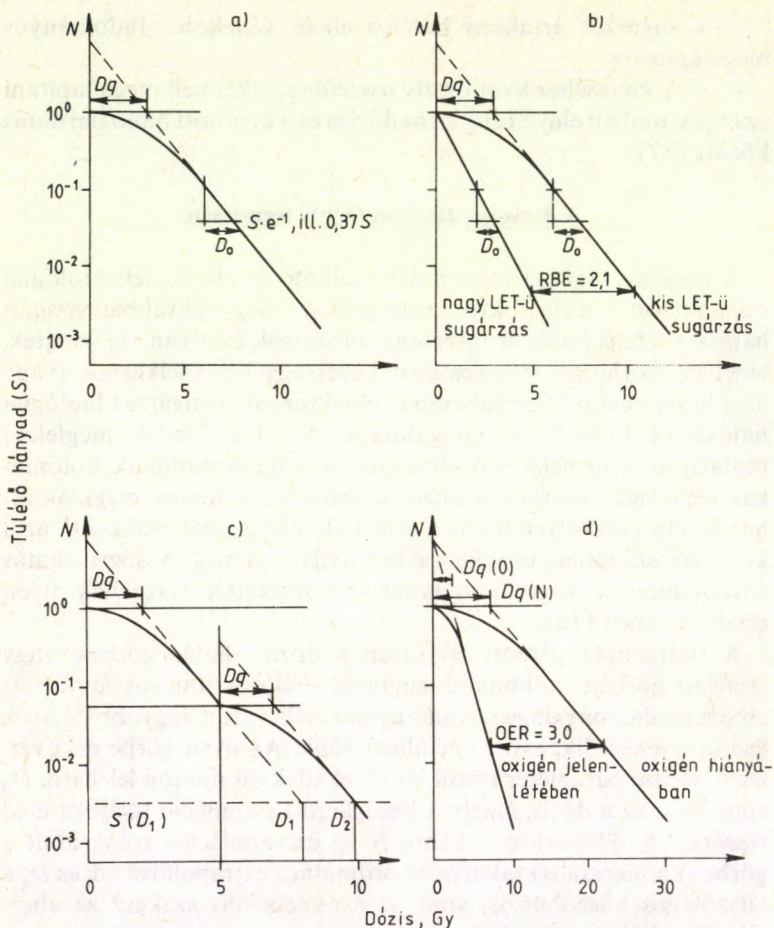
### A dózis—hatás összefüggés természete

A sugárzás legkönnyebben detektálható és mindenféle biológiai objektumon — a vírusoktól az emlősökig — leggyakrabban vizsgált hatása a *letális hatás*. A mikroorganizmusok és olyan emlőssejtek, amelyek korlátlan sejtosztódási képességgel rendelkeznek (vagy arra készíthetők), igen alkalmas objektumok a sugárzás biológiai hatásának kvantitatív vizsgálatára. Az ilyen sejtek megfelelő táptalajon és megfelelő körülmények között szaporodnak, kolóniákat képeznek, amelyek szabad szemmel is könnyen megszámolhatók. Ha valamilyen hatás a sejtek életképességét csökkenti, az a kolóniák számának csökkenésében nyilvánul meg. A dózis—hatás összefüggést a sugárbiológiában előszeretettel vizsgálják ilyen rendszerekben [18].

A röntgenbesugárzott emlőssejtek dózis—hatás görbéje vagy „túlélési görbéje” többnyire szigmoid. Féllogaritmikus ábrázolás esetén az alacsony dózistartományban válla van, a nagyobb dózisok felé kiegyenesedik, exponenciálissá válik. Az ilyen görbe a következő három paraméter közül kettővel adekvát módon leírható:  $D_0$  vagy  $D_{37}$ , az a dózis, amely a besugárzott populáció túlélését e-ed részére, kb. 37%-ára csökkenti;  $N$  az extrapolációs szám, amit a görbe exponenciális szakasza az ordinátára extrapolálva ad; és  $D_q$  a látszólagos küszöbdózis, amit az exponenciális szakasz az abszcisszából kimetsz (1a. ábra).

A manapság leginkább elfogadott értelmezés szerint, a görbe válla azt tükrözi, hogy a kezdetben szubletális hatásoknak akkumulálódnok kell, hogy letálissá váljanak [19].





1. ábra. Különböző körülmények között, in vitro besugárzott emlőssejtek idealizált dózis—hatás görbéi: a) röntgenbesugárzott sejtek jellegzetes dózis—hatás görbéje és fontosabb paraméterei; b) a sugárzás minőségének hatása a túlélési görbe alakjára és meredekségére; c) a dózis frakcionálásának következményei a dózis—hatás görbe lefutásában (a második dózisfrakció,  $D_2$ , ebben az esetben 2 órával követte az első,  $D_1$ , ún. kondicionáló dózist); d) oxigén jelenlétében és hiányában röntgenbesugárzott sejtek dózis—hatás görbéi

## A sugárhatást befolyásoló tényezők

A dózis—hatás összefüggést, s így a görbe lefutását olyan tényezők befolyásolják, mint a sugárzás minősége, a dózisakkumuláció sebessége, bizonyos környezeti tényezők és a biológiai objektum tulajdonságai.

### A sugárzás minősége (LET)

A sugárzás minőségén az energiaátadás térbeni eloszlásának azokat a szubmikroszkopikus jellegzetességeit értjük, amelyek a sugárzás biológiai effektivitását akkor is befolyásolják, ha egyébként az összes fizikai tényező, a leadott energia nagysága, az abszorbeált dózis és a dózisabszorpció sebessége konstans. A sugárzás minőségét első közelítésben a *lineáris energiaátadás* (LET) jellemzi, amit rendszerint  $1 \text{ g/cm}^3$  sűrűségű közegre vonatkozóan  $\text{keV}/\mu\text{m}$  vagy  $\text{J m}^{-1}$  egységekben fejezzük ki [20].

Az elmondottakból következik, hogy két, különböző típusú sugárzás biológiai hatása azonos abszorbeált dózis mellett is különbözhet egymástól. A különbség számszerű kifejezésére vezették be a *Relatív Biológiai Effektivitás* (RBE) fogalmát, amely a referenciasugárzás és a kérdéses sugárzás azon dózisainak arányát jelenti, amelyek azonos biológiai effektust váltanak ki. Referenciasugárzásnak a 200 kV potenciállal gerjesztett röntgensugárzást fogadták el, mert könnyen hozzáférhető, és biológiai hatása is legjobban ismert [21].

A röntgensugárzással és a nagy LET-ű sugárzásokkal kezelt sejtek túlélési görbéi között két lényeges különbség van:

a) utóbbiak rendszerint meredekebbek, tehát az ilyen sugárzások azonos dózisok mellett hatékonyabbak;

b) a görbék válla általában kisebb, sőt néha teljesen hiányzik is (1b. ábra).

A sűrűn ionizáló sugárzások RBE-je az esetek túlnyomó többségében nem állandó érték, hanem a dózis nagyságától, következésképpen a biológiai hatás súlyosságától függ [20].

A gyors neutronok kölcsönhatása a biológiai szövetekkel erősen ionizáló, magas LET-ű partikulákat: protonokat, alfa-részecskéket



és nehéz atommagokat eredményez. Ezek LET-spektruma 3—800 keV/ $\mu$ m között változik, míg a röntgen- és gamma-sugárzás elnyelődésekor képződő elektronoké nagyrészt 1 keV/ $\mu$ m alá esik, és nem terjed 30 keV/ $\mu$ m-en túl. Az emlősejtek biológiai reakciói 50 keV/ $\mu$ m alatt alig függenek a LET változásaitól, fölötte viszont annál inkább [22].

#### A dózisakkumuláció sebessége

Az 50-es évek vége felé mutatták ki, hogy ha a túlélési görbének válla van, a sugárdózis kettéosztása és néhány órás szünet közbeiktatása mérsékli a sugárzás letális hatását, növeli a túlélő sejtek számarányát (1c. ábra). A jelenséget annak tulajdonítják, hogy a besugárzások közötti időszakban a sejtek kijavítják, reparálják a károsodás egy részét, és a második sugáradag úgy hat, mintha az első frakciót túlélő sejtek kisebb sugáradagot kaptak volna. A helyreállítás percekkel az expozíció után megindul és órákig folytatódik [23].

Nagyobb LET-ű sugárzások esetén, amikor a túlélési görbe válla lapos, a reparáció kisebb fokú. A dózis frakcionálása kevésbé befolyásolja a túlélési görbét. Ebből következik, hogy a gyors neutronok RBE-je annál nagyobb, mennél kisebb a dózisakkumuláció sebessége [24].

#### Oxigéneffektus (OER)

A környezeti tényezők közül legdrasztikusabban befolyásolja a konvencionális ionizáló sugárzások biológiai hatását az oxigén. Az oxigén jelenlétében és hiányában kapott túlélési görbék exponenciális szakaszai irántangensének hányadosát az *oxigénérősítés hatásfokának* (OER) nevezik (1d. ábra). A röntgen- és gamma-sugárzás OER-je 2,5—3,0 között mozog [25].

A sűrűn ionizáló sugárzások biológiai hatását az oxigén kevésbé befolyásolja. Gyors neutronokkal 1,2—1,7 közötti OER-t kaptak emlős sejttrendszerekben. Az irodalomban ellentmondó adatok vannak arra nézve, hogy az OER változik-e a neutronenergia függvényében [26—28].

Az emlőssejtek életét négy jól elkülöníthető szakaszra osztjuk: M a mitózis vagy sejtosztódás szakasza,  $G_1$  az ezt követő és  $G_2$  az ezt megelőző átmeneti szakasz, S a sejtmagi DNS szintézisének időszaka. A sejtek sugárérzékenysége a sejtciklusban elfoglalt helyzetüktől függően változik, valószínűleg azzal összefüggésben, hogy változik a szubletális károsodásokat kijavító képességük. Általában a mitózis idején és a  $G_1$ —S közötti időszakban a leginkább sugárérzékenyek, a korai  $G_1$  és késői S fázisban a sugárrezisztenciájuk nagyobb, reparációs képességük ekkor maximális.

A nagyobb LET-ű sugárzások iránti érzékenységben nincsen ilyen jelentős különbség a sejtciklus egyes fázisai között [29].

### A neutronok orvostudományi alkalmazása

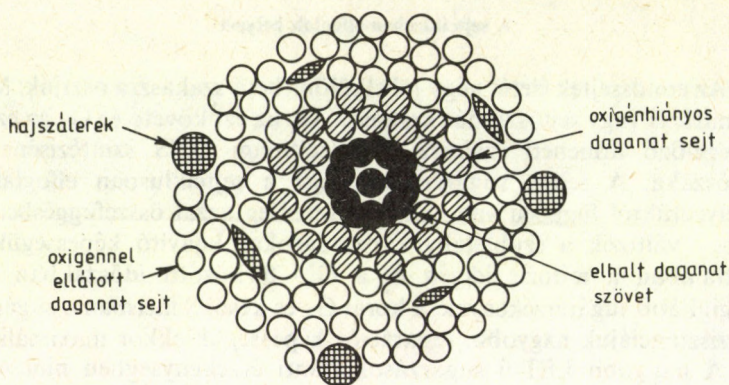
Az olyan közvetett alkalmazásoktól eltekintve, mint a diagnosztikában ma már nélkülözhetetlen nyomjelző technika és a biológiai minták aktivációs elemzése, a neutronok közvetlen orvostudományi alkalmazása a következőket jelenti:

- sugárterápia gyors neutronokkal,
- sugárterápia lassú neutronokkal,
- neutronradiográfia,
- in vivo aktivációs analízis [17].

#### Sugárterápia gyors neutronokkal

A rosszindulatú daganatok belsejében többnyire rossz vérrellátású, hypoxiás, és ennek következtében a sugárzás iránt kevésbé érzékeny sejtek vannak, amelyeket a konvencionális röntgen- és gamma-sugárzással nehezebb elpusztítani, mint a daganatot körülvevő, jó vér- és oxigénellátású ép szövetek sejtjeit (2. ábra). A nagy LET-ű sugárzások biológiai hatását az oxigén kevésbé befolyásolja, oxigénérősítési tényezőjük közelebb áll az egyhez. Ez a magyarázata a neutronok terápiás alkalmazása iránt megnyilvánuló, megújuló érdeklődésnek [30—33].





2. ábra. Oxigénnel jól és rosszul ellátott sejtek elhelyezkedése a daganat belsejében (vázlat)

A II. világháború után felhalmozódó sugárbiológiai ismeretek birtokában, a londoni Hammersmith Hospital munkatársai 1966-ban felújították a terápiás célú besugárzásokat gyors neutronokkal, amelyeket az MRC ciklotronjából nyertek, Be-céltárgy 16 MeV energiájú deutronokkal való bombázásával. A kezdeti, biztató eredmények hatására, 1967-ben egy japán intézmény, majd a 70-es években más országok intézményei is csatlakoztak ezekhez a próbálkozásokhoz. A neutronterápiás központok száma jelenleg 20 körüli, s eddig mintegy 6000 beteget kezeltek.

Az intézetek túlnyomó többségében [32] ciklotronban állítják elő a neutronnyalábot, berillium céltárgy 7—100  $\mu$ A áramerősségű és 12,5—50 MeV energiájú deutronbombázásával. Az utóbbi években fokozatosan alkalmazást nyertek a neutrongenerátorok is [5], amelyekből 100—500 keV körüli deutronokkal 14—15 MeV-os neutronok nyerhetők. A ilyen neutronok áthatolóképesége és mélydózis-eloszlása nagyjából megegyezik a  $^{60}\text{Co}$ -gamma-sugárzásával. A jelenleg terápiára használt 12 ciklotron közül csak 5 képes ezt a követelményt kielégíteni.

Az eddigi klinikai eredményekből még nem lehet egyértelmű következtetést levonni a neutronterápia hatékonyságára. A Ham-

1. táblázat. Fejen és nyakon elhelyezkedő, rosszindulatú daganatok sugárkezelésének eredményei a Hammersmith Hospitalban [34]

Paraméter	Neutronterápia		Fotonterápia	
	eset	%	eset	%
Kezelt betegek száma	70	100	63	100
Daganat visszafejlődése				
— teljes	54	77	27	43
— részleges	16	23	36	57
Túlélés				
— egy év múlva	53	76	42	67
— két év múlva	28	40	15	24
Súlyos komplikáció	10	14	2	3

mersmith Hospital 6,7 MeV közepes energiájú neutronnyalábjával, a rossz áthatolóképesség miatt, csak felületesen elhelyezkedő, elsősorban feji, nyaki, emlő- és bőrdaganatokat kezelnek. A kezelt daganatok teljes visszafejlődését nagyobb arányban észlelték a neutron-, mint a konvencionális fotonkezelés után, valamivel jobb volt a túlélés, de nagyobb arányban jelentkeztek súlyos szövödmények is (1. táblázat).

Valamennyi intézmény eddigi eredményeit összevetve, a kép eléggé ellentmondásos, amiért általában a neutronforrások technikai tökéletlenségét teszik felelőssé [34].

### Lassú neutronok befogásán alapuló sugárterápia

A kezelés lényege abban áll, hogy a daganatszövetet olyan stabilis elemmel telítik, amelynek nagy a neutronbefogási hatáskeresztmetszete, s amelyik erősen ionizáló, nagy LET-ű sugárzást bocsát ki: pl.  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ . Sajnos, ezeknek az elemeknek a vegyületei egyrészt bomlékonyak, másrészt toxikusak. Csak a 60-as évek végéig sikerült olyan szerves bórvegyületet előállítani, amelyet be lehet adni betegeknek. A lassú neutronok rossz áthatolóképessége miatt, elsősorban felszínesen elhelyezkedő rosszindulatú daganatok kezelésére történtek próbálkozások. Eddig igen kevés esetről tudunk.



Nemrégiben Hatanaka és Sweet (Tokio és Boston) két olyan glioblastomás betegről számolt be, akiket kizárólag neutronbefogásos kezelésben részesítettek. Mindkét betegük felépült, és több, mint három év óta dolgozik. A betegségben szenvedők átlagos élettartama konvencionális sebészi és gamma-sugaras kezelés esetén legfeljebb 6—10 hónap [35—37].

### Neutronradiográfia

Újabban ismételten felmerült a neutronradiográfia orvosi alkalmazásának lehetősége is. Minthogy a neutronokat elsősorban a hidrogénatomokon történő rugalmas szóródás gyengíti, míg a röntgensugárzást a nehezebb atomok jelenléte, neutronradiográfiával ki lehet küszöbölni a csontok zavaró hatását. Jó kontrasztot ad viszont a levegő a lágy szövetekhez képest és számos daganatszövet is, ha hidrogéntartalma magasabb, mint a környező ép szöveteké. Ez a feltétel bizonyos daganatokra vonatkozóan teljesül [38].

Az emberi testen azonban csak a nagy energiájú, gyors neutronok képesek áthatolni. A legfőbb technikai problémát a radiogram láthatóvá tétele és a neutronok szóródása miatti alapfátyol kiküszöbölése jelenti. A kép megjelenítése neutronaktiváción alapszik. Jelenleg csak a Hammersmith Hospital ciklotronjával végeznek neutronradiográfiát a terápiás besugárzásokhoz kapcsolódva, a beteg helyes beállításának ellenőrzése céljából [39].

### In vivo aktivációs analízis

A betegtől levett szövet- és váladékminták aktivációs elemzése régen bevonult a klinikai laboratóriumi vizsgálómódszerek közé. In vivo aktivációs analízishez a vizsgált személy testét vagy valamely testrészét sugározzák be neutronokkal. A vizsgálat során kapott szöveti dózis általában nem nagyobb, mint a szokásos röntgen- vagy izotópos vizsgálat révén kapott sugárterhelés [40].

Egésztest-neutronbesugárzással lehetőség van a következő elemek mennyiségi meghatározására: O, H, N, Ca, P, Na, Cl és Mg. A Fe, I, Mn, Cu és Cd szöveti koncentrációja parciális besugárzással is meghatározható. Egésztest-besugárzáshoz ciklotront, neutronge-

nerátort vagy izotópos neutronforrást ( $^{238}\text{Pu}$ —Be,  $^{241}\text{Am}$ —Be) használnak, parciális besugárzást pedig az utóbbiakkal vagy reaktorrall végeznek [41].

### Neutronsugárzás elleni védekezés biológiai alapjai

A neutronsugárzásnak az emlős szervezetekre, köztük az emberre gyakorolt hatása minőségileg legfeljebb abban különbözik az ismertebb ionizáló sugárzások hatásától, hogy a neutronok radioaktivitást indukálnak a testszöveteket felépítő elemek egy részében (Na, Cl, P stb.), ami — az egészen magas kvantumenergiájú röntgen- és gamma-sugárzástól eltekintve — általában nem jellemző [42, 43]. Tehát indukált radioaktív nuklidok detektálása az emberi testben baleseti neutron- vagy kevert neutron—gamma besugárzás esetén diagnosztikai értékű [44].

A sugárzás okozta ártalom megnyilvánulhat az egyéni életműködés fenntartását szolgáló sejtek károsodásában (szomatikus sugárártalom) vagy a fajfenntartás és öröklődés folyamatosságát biztosító sejtek károsodásában (genetikai sugárártalom). A hatás mindkét esetben lehet enyhe, szubletális vagy súlyos, letális, a besugárzott szervezet elpusztulásához vezető. A sugárhatás *korai* következményei órákon vagy napokon belül jelentkeznek, míg a *késői* következmények többnyire csak évek vagy évtizedek múlva követik a sugárbehatást.

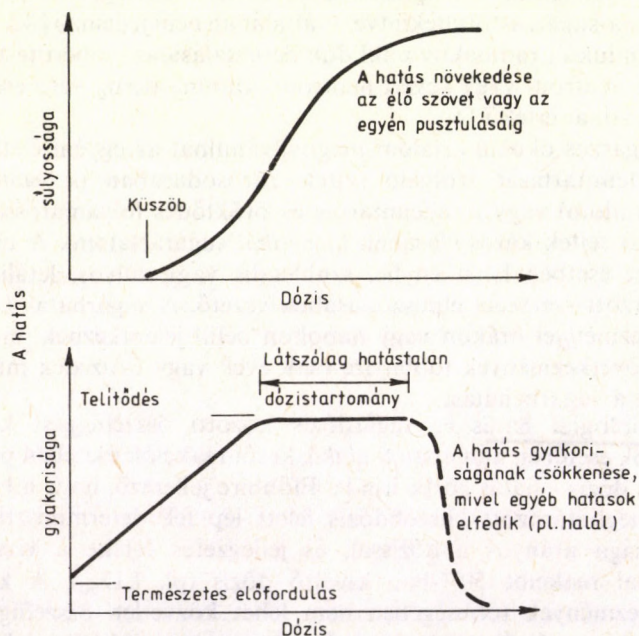
A biológiai hatás és sugárdózis közötti összefüggést korai reakciók esetében általában *S alakú*, késői reakciók esetében pedig *lineáris* dózis—hatás görbe írja le. Előbbire jellemző, hogy a hatás csak meghatározott küszöbdózis felett lép fel, determinisztikus, súlyossága arányos a dózissal, és jellegzetes értéke a vizsgált biológiai reakciót 50%-ban kiváltó dózis (pl.  $\text{LD}_{50}$ ). A késői következmények többségében nem lehet közvetlen összefüggést kimutatni az egyedi esetek súlyossága és a sugárdózis között, a hatás sztochasztikus, csak az előfordulás gyakorisága arányos a dózissal, mégpedig széles dózistartományban lineárisan. Eddig nem sikerült hitelt érdemlően bizonyítani küszöbdózis létezését, tehát a legkisebb



dózisú besugárzás után is bizonyos valószínűséggel várható a késői következmények fellépése (3. ábra).

A korai sugárhatal oka és bekövetkezésének ideje ugyancsak a dózis függvénye: 50 Sv felett a halál 1—2 nap alatt beáll, az ideg- és keringési rendszer súlyos károsodása miatt; 10 és 50 Sv közötti dózisok után 1—2 hét múlva, elsősorban az emésztőrendszer károsodása következtében; míg 10 Sv alatt (de 1 Sv felett) 1—2 hónap múlva, s a vérképző rendszer károsodása okozza [45].

Mind a korai, mind a késői hatások tekintetében *menyiségi* különbségek észlelhetők egyrészt a konvencionális röntgen- és gamma-sugárzás, másrészt a neutron- és egyéb nagy LET-ű



3. ábra. Korai és késői emberi sugársérülések idealizált dózis—hatás görbéi: a) korai sugársérülés (pl. vérkép-elváltozás) szigmoid dózis—hatás görbéje; b) késői sugársérülés (pl. rosszindulatú daganat keletkezése) lineáris dózis—hatás görbéje [50]

sugárzások között. E különbségek oka az utóbbi sugárzástípusok magasabb RBE-je és hatásuk viszonylagos függetlensége a dózisakkumuláció sebességétől, valamint a szerveket és szöveteket felépítő sejteknek a sejtciklusban elfoglalt helyzetétől.

Nincsenek megbízható adatok arra nézve, hogy az emberi akut sugárhálál tekintetében a neutronsugárzás hányszor hatékonyabb, mint a röntgensugárzás. Állatkísérletekben 1,5—3 közötti RBE értékeket találtak, de nagyobb állatokon ennél alacsonyabbakat is. Biztosnak tekinthetjük viszont, hogy a különböző szervek és szövetek érzékenysége a neutronok iránt nem azonos mértékben fokozott. Különösen érzékeny a tápcsatorna.

A késői hatások kiváltásában az előzőeknél jóval magasabb RBE értéket is találtak, nemcsak állatkísérletekben, hanem embereken is. Példa erre a leukémia előfordulási gyakorisága Hiroshimában és Nagaszakiban az atombombázás túlélői között [46]. Ugyancsak fokozott hatékonyság figyelhető meg állatkísérletekben a genetikai mutációk előidézésében [47, 48].

A sugárvédelem gyakorlatában a sugárzás minősége által okozott különbségek figyelembevétele céljából bevezették a *minőségi tényező* (kvalitásfaktor) fogalmát. Ennek megfelelően, a biológiai hatás tulajdonképpen nem a szövetekben abszorbeált dózissal, hanem a *dózisegyenértékkel* arányos, ami az abszorbeált dózis és a minőségi tényező, a relatív biológiai effektivitással többé-kevésbé analóg faktor, szorzata. A Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság (ICRP) legújabb, 1977. évi ajánlásaiban a gyors neutronok minőségi tényezője 10, míg a termikus neutronok effektív minőségi tényezője 2,3 [49].

## Összefoglalás

A neutron felfedezését követően csakhamar megindultak a biológiai hatásának megismerésére irányuló kutatások. Tisztázták, hogy a neutronok dóziségségre vonatkoztatott biológiai hatása csakúgy, mint minden más, nagy lineáris energiaátadással jellemezhető sugárféleségé, általában nagyobb, mint a hagyományos röntgen- és gamma-sugaraké, kevésbé függ a dózisakkumuláció



sebességétől, az élő szervezet sejtjeinek oxigénellátottságától és sejtciklusban elfoglalt helyzetétől.

A neutron biológiai hatásának sajátosságaira vonatkozó ismeretek szélesedése tette lehetővé az orvostudományi alkalmazások fokozatos térhódítását. Ma már közel két tucatnyi olyan intézmény található szerte a világon, amelyben sikeresen kezelnek daganatos betegeket gyors neutronokkal. Kisebb mértékben fejlődött a lassú neutronok befogásán alapuló sugárterápia és a gyors neutronokkal végzett radiográfia. Ennek elsősorban műszaki okai vannak. A betegtől levett vér-, szövet- és váladékminták aktivációs elemzése viszont régen bevonult a klinikai laboratóriumi vizsgálmódszerek közé. Jóval korlátozottabb az *in vivo* aktivációs analízis alkalmazása.

A neutronok fokozott biológiai hatékonyságát azonban figyelembe kell venni az ártalmas hatásaik elleni védekezés során is. Ami tehát előny az orvostudományi hasznosítás szempontjából, az hátrány a sugárvédelmi gyakorlat számára. A kis dózisé neutron-sugárzás emberre gyakorolt hatásának kvantitatív törvényszerűségeit még távolról sem sikerült megismerni. E törvényszerűségek feltáráshoz feltétlenül szükség van a hazai szakemberek intenzív közreműködésére.

## Irodalom

1. E. O. LAWRENCE—M. S. LIVINGSTONE: *Phys. Rev.* **40** (1932) 19.
2. J. H. LAWRENCE—E. O. LAWRENCE: *Proc. N. A. S.* **22** (1936) 124.
3. J. H. LAWRENCE—P. C. AEBERSOLD—E. O. LAWRENCE: *Proc. N. A. S.* **22** (1936) 543.
4. G. L. LOCHER: *Am. J. Roentgen. Radium Ther.* **36** (1936) 1.
5. R. S. STONE—R. V. LOUIE—G. D. ADAMS: in *Progress in Radiology* (*Proc. 11th Int. Congr. on Radiology, Rome, 1965*). *Exc. Med. Found. Publ., Amsterdam, 1967*, Vol. I, p. 893.
6. *Biological effects of External X and Gamma Radiation*, Ed. R. E. ZIRKLE. McGraw-Hill Book Co., New York, 1954, Part I.
7. *Peaceful Uses of Atomic Energy* (*Proc. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1955*). United Nations, New York, 1956, Vol. I—XVI.
8. Az ENSZ Ionizáló Sugárzások Biológiai Hatásaival Foglalkozó Külön Bizottságának Jelentése — 1958 (Kézirat gyanánt). OAB Egészségvédelmi Szakbizottsága, Budapest, 1959.

9. SZTANYIK B. L.: A Magyar Biofizikai Társaság Értesítője — V. Szerk.: TIGYI J.—RONTÓ GY., Budapest, 1975, 139. old.
10. SZTANYIK B. L.: A Magyar Biofizikai Társaság Értesítője — VI. Szerk.: TIGYI J.—RONTÓ GY., Budapest, 1978, 114. old.
11. L. S. TAYLOR: Radiation Protection Standards. CRC Press, Cleveland, 1971.
12. SZTANYIK L.: Atomtechnikai Tájékoztató **10** (1967) 685.
13. SZTANYIK L.—GESZTI O.—MÁNDI E.: A Magyar Biofizikai Társaság Értesítője. Szerk.: TIGYI J.—HORVÁTH I., Budapest, 1963, 89. old.
14. SZTANYIK L.—GESZTI O.—FEHÉR I.—MAKRA Zs.: Mitteilungsblatt der Biophys. Ges. in der DDR, 1964, 11/1.
15. L. B. SZTANYIK: in Effects of Ionizing Radiations on the Haematopoietic Tissue (Panel Proc. Ser.). IAEA, Vienna, 1967, p. 111.
16. SZTANYIK L.: in Az Országos „Frédéric Joliot-Curie” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet 10 Éve. Szerk.: VÁRTERÉSZ V. Medicina Könyvkiadó, Budapest, 1967, 92. old.
17. SZTANYIK B. L.: ATOMKI Közlemények Melléklet **17** (1975) 119.
18. M. M. ELKIND—G. F. WHITMORE: The Radiobiology of Cultured Mammalian Cells. Gordon and Breach, New York, 1967.
19. T. ALPER: in Radiation Biology in Cancer Research. Ed.: R. E. MEYN—H. R. WHITERS. Raven Press, New York, 1980, p. 3.
20. H. H. ROSS: in Radiation Dosimetry. Ed.: G. W. REED. Academic Press, New York, 1964, p. 108.
21. L. B. SZTANYIK: in In vivo Neutron Activation Analysis (Panel Proc. Ser.). IAEA, Vienna, 1973, p. 23.
22. D. K. BEWLEY: Europ. J. Cancer **7** (1971) 99.
23. M. M. ELKIND—H. SUTTON: Radiat. Res. **13** (1960) 556.
24. H. B. KAL—G. W. BARENDSEN—J. J. BROERSE: Europ. J. Cancer **10** (1974) 293.
25. D. EWING—E. L. POWERS: in Radiation Biology in Cancer Research. Ed.: R. E. MEYN—H. R. WHITERS. Raven Press, New York, 1980, p. 143.
26. G. W. BARENDSEN—J. J. BROERSE: Nature **212** (1966) 722.
27. R. J. BERRY: Europ. J. Cancer **7** (1971) 145.
28. R. H. THOMLINSON: Europ. J. Cancer **7** (1971) 139.
29. W. K. SINCLAIR: in Biophysical Aspects of Radiation Quality. IAEA, Vienna, 1968, p. 39.
30. M. CATTERALL—C. ROGERS: Brit. J. Radiol. **44** (1971) 603.
31. Fundamental and Practical Aspects of the Application of Fast Neutrons in Clinical Radiotherapy (Proc. Int. Meeting, Rijswijk, 1970). Europ. J. Cancer **7** (1971) 97—267.
32. Fundamental and Practical Aspects of the Application of Fast Neutrons in Clinical Radiotherapy (Proc. 2nd Int. Meeting, Rijswijk, 1973). Europ. J. Cancer **10** (1974) 199—398.
33. High-LET Radiation in Clinical Radiotherapy (Proc. 3rd Int. Meeting, The Hague, 1978). Ed.: G. W. BARENDSEN—J. J. BROERSE—K. BREUR. Pergamon Press, Oxford, 1979.
34. J. J. BOERSE—J. J. BATTERMANN: Med. Phys. **8** (1981) 751.



35. H. HATANAKA—W. H. SWEET: in Biomedical Dosimetry. IAEA, Vienna, 1975, p. 147.
36. B. W. MURRAY et al.: *ibid.*, p. 179.
37. K. KANDA et al.: *ibid.*, p. 205.
38. M. BROWN—P. B. PARKS: *Am. J. Roentgen. Radium Ther.* **106** (1969) 472.
39. D. K. BEWLEY—M. CATTERALL—B. C. PAGE: *Brit. J. Radiol.* **46** (1973) 24.
40. In vivo Neutron Activation Analysis (Panel Proc. Ser.). IAEA, Vienna, 1973.
41. Bibliography on In vivo Activation Analysis. Ed.: K. BODDY. S. U. R. R. C. 65/78, East Kilbride, 1978.
42. SZTANYIK L.—GESZTI O.: A Magyar Biofizikai Társaság Értesítője. Szerk.: TIGYI J.—HORVÁTH I. Budapest, 1963, 35. old.
43. SZTANYIK L.—TITTE G.: *ibid.*, 88. old.
44. Evaluation of Radiation Emergencies and Accidents — Selected Criteria and Data (Techn. Rep. Ser. No 152). IAEA, Vienna, 1974.
45. SZTANYIK B. L.: in Munkaegészségtan — Üzemegészségtan. Szerk.: TIMÁR M. Medicina Könyvkiadó, Budapest, 1981, 579. old.
46. L. B. SZTANYIK: in Late Biological Effects of Ionizing Radiation. IAEA, Vienna, 1978, Vol. I, p. 61.
47. M. A. BENDER: in Neutrons in Radiation Biology (Symp., Oak Ridge, 1969). CONF-691106, USAEC, Washington, D. C., 1969, p. 315.
48. Neutrons in Radiation Biology and Therapy (Bibliographical Ser. No 40). IAEA, Vienna, 1971.
49. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Pergamon Press, Oxford, 1977.
50. C. B. BRAESTRUP—K. J. VIKTERLÖF: Manual on Radiation Protection in Hospitals and General Practice. Vol. 1 — Basic Protection Requirements. WHO, Geneva, 1974.

# A neutronok és az energiatermelés

Szabó Ferenc

MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

Az a gondolat, hogy az újonnan felfedezett neutronok segíthetnek az atomenergia felszabadításában, 1933-ban Szilárd Leó fejében született meg. A neutronok közvetítésével végbemenő láncreakció elvét 1935-re Szilárd már annyira komolyan vette, hogy a periódusos rendszer valamennyi elemét meg akarta vizsgálni abból a szempontból, hogy kilép-e valamelyikből neutronsugárzás hatására egynél több neutron. A kísérletsorozat 8000 dollárra becsült költségét azonban nem sikerült megszereznie. A magfizika iránti érdeklődését viszont e probléma keltette fel, és — mint írja — 1935 és 1938 között szakértővé vált, azaz olyan emberré, aki tudja, mit nem lehet megcsinálni. Amint azonban 1939 januárjában tudomásra jutott a maghasadás felfedezése, már azt is sejtette, hogy mit lehet. 1942. december 2-án Chicagóban kritikussá vált az első atomreaktor, melyet 1955-ben mint Enrico Fermi és Szilárd Leó találmányát neutronreaktor néven jegyeztek be.

Ma már tudjuk, hogy a gazdaságosan kibányászható uránmennyiség erősen korlátozott. Csupán a természetes hasadó izotópokra támaszkodva nem lehet az emberiség energiaigényét huzamosan kielégíteni. Elkerülhetetlen új hasadóanyagok termelése, vagy a fúziós energiataralékok hasznosítása. Ebben a törekvésben a neutronok három szerepkörben jelennek meg:

1. a hasadási reaktorban fenntartják a láncreakciót;
2. a fúziós reaktorban elszállítják a felszabaduló energia nagy részét;



3. mindkét reaktortípus esetén újratermelhetik az üzemanyagot. Ez az úgynevezett tenyésztés.

Az első két funkció olyan fundamentális fizikai jelenséghez kapcsolódik, amely ma már nem igényel külön diszkussziót. Ezért a következőkben a neutronnak a reaktor üzemanyag-újratermelésének folyamatában betöltött szerepével foglalkozunk, annál is inkább, mivel köztudott, hogy az energiatermelés csak olyan reaktorrendszerben perspektivikus, amely kevesebb üzemanyagot használ fel, mint amennyit termel. A fúziós reakciókban keletkező neutronok további sorsa nem befolyásolja magát a fúziós folyamatot, tehát e neutronok felhasználhatók trícium- vagy hasadóanyag-termelésre. A hasadási reaktorban azonban a láncreakció és a hasadóanyag-termelés egymás konkurrenciái, meg kell osztozniuk a hasadásban keletkező néhány neutronon. Ebben további versenytársaik is vannak: a reaktor szerkezeti anyagaiba való befogás, a szabályozás és a kiszökés. Ezért a hasadási reaktorok megítélésénél nagy hangsúlyt kap a neutron hasznosításának a különböző folyamatok közötti mérlege. Nézzük ezt először tisztán magfizikai szempontból.

1. táblázat. Az  $\eta$  neutronregenerációs tényező értékei

Neutronenergia	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{233}\text{U}$
Termikus	2,07	2,09	2,29
1 MeV felett	2,3	2,7	2,45

A különféle hasadóizotópokra jellemző, hogy hasadás útján hány neutron termelnek egy abszorbeált neutronra vonatkoztatva. Az 1. táblázat ezen  $\eta$ -értékeket mutatja be kétféle neutronspektrumban. A számok 2 és 2,7 között váltakoznak. A neutrontermelés ára 1 neutron elnyelése és 1 hasadómag elpusztulása. Tehát a nettó haszon 1—1,7 neutron. Ugyanekkor legalább 1 további neutronnak kell tenyésztőmagban elnyelődnie ahhoz, hogy az elpusztult hasadómag pótlódjék. A tenyésztés elengedhetetlen feltétele tehát az, hogy  $\eta$  2-nél nagyobb legyen. Az elkerülhetetlen neutronvesztések miatt úgy tűnik, hogy még 2,5-nél is nagyobb értékre van

2. táblázat. Neutronmérleg

Folyamat	Gyorsreaktor	Termikus reaktor
Abszorpció hasadó magban	37,2	46,9
Abszorpció fertilis magban (befogás + hasadás)	$29,5 + 6,3 = 35,8$	$21,5 + 2,7 = 24,2$
Veszteségek		
kiszökés + szabályozás	$13,0 + 9,0 = 22,0$	$8,1 + 16,1 = 24,2$
egyéb	5,0	4,7
Összesen	100	100

szükség. Ez csupán 1 MeV feletti energián és csak  $^{239}\text{Pu}$ -ra teljesül. Így tehát hasadóanyag-tenyésztésre csak  $^{239}\text{Pu}$ -ot felhasználó gyorsreaktorokban lehetne remény.

Egy valóságos reaktor működése természetesen ennél az egyszerű képnél jóval komplikáltabb.

Nézzük meg először egy tipikus gyorsreaktor és egy tipikus termikus energiatermelő reaktor neutronmérlegét. Mindkét reaktor körülbelül 1000 MW villamos teljesítményt szolgáltat. A 2. táblázatban az épülő francia Super Phénix gyorsreaktor és egy ma működő nyomottvizes erőműreaktor adatait tüntettük fel. Az adatok úgy vannak normálva, hogy a hasadásban időegység alatt keletkező neutronok száma 100 legyen. A láncreakció fenntartását az biztosítja, hogy a feltüntetett folyamatok együttesen szintén 100 neutront fogyasztanak.

A két eléggé különböző felépítésű reaktorra vonatkozó számok sok hasonlóságot mutatnak. Ez különösen igaz a veszteségrovatokra. A hasadómagban bekövetkező abszorpció jellemző a hasadóanyag fogyására, a tenyésztőmagban bekövetkező pedig a tenyésztésre. Ezek a számok eltérnek a két reaktor esetében, de megegyeznek abban, hogy több hasadóanyag fogy, mint amennyi keletkezik. Termikus reaktorra ezt magfizikai alapon vártuk is, de gyorsreaktorra ennél valamivel jobbat reméltünk. A negatív eredmény magyarázata, hogy az energetikai célú gyorsreaktorok neutronspektruma sokkal lágyabb a hasadási spektrumnál, így itt  $\eta$  értéke kisebb. Mindezek után jogosan kérdezhetjük: hogyan lehet mégis gyorsreaktorban tenyészteni?



A gyorsreaktor tenyésztővé úgy tehető, hogy az aktív zónából kiszökő, a láncreakció szempontjából felesleges neutronokat is tenyésztésre hasznosítjuk. Ha az aktív zónát tenyésztőköpennyel vesszük körül, akkor ez a kiszökő neutronokat elnyeli, hasadóanyag-termelésre hasznosítja, és így pozitívvá változtatja a hasadóanyag-mérleget. A 2. táblázat adataival számolva

$$29,5 + 13,0 = 42,5$$

neutron fog tenyészanyagban befogódni, ami több, mint a hasadóanyag fogyasztása: esetünkben 37,2. Látható, hogy termikus reaktor esetén ilyen köpeny alkalmazása sem használ, hiszen

$$21,5 + 8,1 = 29,6 < 46,9.$$

A reaktor üzeme során a reaktor anyagi összetétele folyamatosan változik. Ezért éves üzemi ciklusra vonatkozó adatok többet mondhatnak a SuperPhénix reaktor anyagmérlegéről. A 3. táblázatnak az adatai alátámasztják korábbi elképzeléseinket. Az aktív zóna

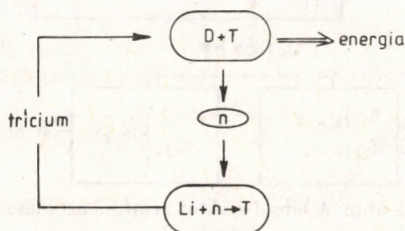
3. táblázat. A SuperPhénix egy éves hasadóanyag-mérlege (a megadott számok plutóniumtömeget jelentenek kg-ban)

	Fogyasztás	Termelés	Nyereség
Zóna	900	770	– 130
Köpeny	—	330	330
Egész reaktor	900	1100	+ 200

valóban hasadóanyag-deficites; ezt a köpeny nyereségesre tudja változtatni. Mindamellet a hasadóanyag-termelés zöme (70%-a) az aktív zónában történik, a nyereség pedig két nagy szám kis különbségeként jön létre. Ezért a számítások pontossága, a felhasznált magfizikai adatok megbízhatósága rendkívül nagy jelentőséget kap. Hangsúlyoznunk kell, hogy a neutronok spektruma és a felhasznált izotópösszetétel döntő szerepet játszik — és nem mindig helyesen értelmezett effektusokkal jár. Az 1000 MW-os teljesítményszinten ugyanis már a nagy reaktorméret, az alacsony dúsítás és az ebből eredő lágy spektrum miatt a rezonanciatar-

ományba is jelentős mennyiségű neutron kerül. Az itt érvényes hatáskeresztmetszetek (és ezen keresztül az izotópösszetétel) már döntő szerephez jutnak, az  $\eta$  „jósa” pedig elveszti központi jelentőségét.

A fúziós reaktornak ilyen értelemben vett neutronháztartása nincs, annál kiélezettebb viszont az energiamérleg. A fúziós reaktor reakciósémája szerint, mint az az 1. ábrán látható, az energiatermelő

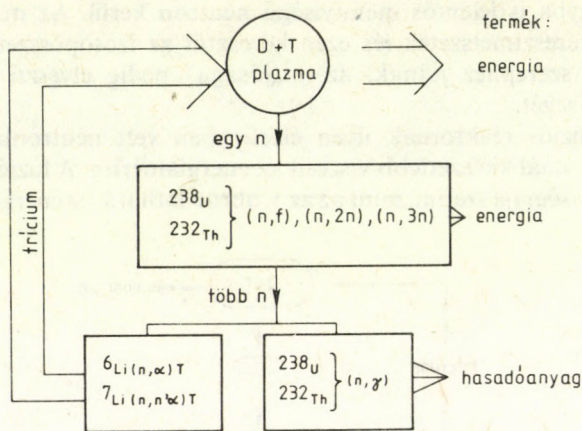


1. ábra. A fúziós reaktor reakciósémája

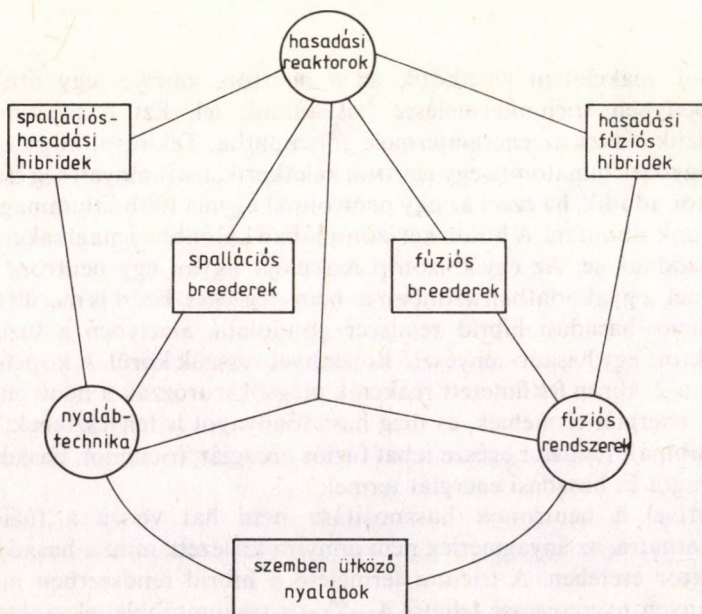
$D+T$  reakcióban keletkezik az a neutron, amelyet egy lítium köpenyben tríciumtermelésre használunk fel. Ezt a tríciumot visszük vissza az energiatermelő folyamatba. Tekintve, hogy egy elfogyó tríciumatomra egy neutron keletkezik, tríciumnyereség csak akkor adódik, ha ezzel az egy neutronnal egynél több lítiummagot tudunk elbontani. A lítium két izotópjában különböző magreakciók játszódnak le. Az egyik izotóp reakciója ugyan egy neutront is termel, a gyakorlatban azonban ez nem elégséges. Ezért is merült fel a fúziós-hasadási hibrid rendszer gondolata, amelyben a fúziós reaktort egy hasadó-tenyésztő köpennyel vesszük körül. A köpenyben a 2. ábrán feltüntetett reakciók megsokszorozzák a neutronokat, energiát termelnek, és még hasadóanyagot is tenyésztenek. A kombinált rendszer egésze tehát fúziós energiát, tríciumot, hasadóanyagot és hasadási energiát termel.

Mivel a neutronok hasznosítása nem hat vissza a fúziós folyamatra, az anyagmérleg nem annyira kiélezett, mint a hasadási reaktor esetében. A trícium termelése a hibrid rendszerben már könnyen nyereségessé tehető: 4–5%-os tríciumtöbblettel szoktak





2. ábra. A hibrid reaktor neutronháztartása



3. ábra. Szinergetikus rendszerek

számolni. Természetesen a műszaki problémák óriásiak, hiszen például a szaporítóköpenyt is a plazmát együtt tartó tekercs belsejében kell elhelyezni.

Most tehát az a kép áll előttünk, hogy a neutronszegény és energiában gazdag fissziós folyamat előnyösen kombinálható a fúzióval, amely viszonylagosan szegény energiában és neutronfeleslege van. Rövid távon fisszió, hosszabb távon fúzió — ez az energiatermelés jövője, ez az elképzelés él a gondolkodás fő irányában, és korán megjelent a horizonton a kettő kombinációja. Az emberi gondolkodás mellékágán azonban felmerült egy harmadik nukleáris technológia is, mégpedig a spallációs magreakciók kapcsán a nyalábtechnológia. Gyorsítókban keltett több száz MeV-os bombázórészecskék alkalmas célanyagokból nagyszámú neutron szabadítanak fel, és ezek a neutronok ugyanúgy hasznosíthatók, mint a fúzióban vagy a hasadásban keletkezők.

Kézenfekvő, hogy a nyalábtechnológiát is bevonjuk a gondolkodás körébe, és nézzük együtt a három alapvető folyamatot, mint egymás komplementerjeit az összes kombinációs lehetőségekkel együtt. A 3. ábra szemléletesen mutatja, hogy a három alapvető elem: a hasadási reaktor, a fúziós reaktor és a nyalábtechnika különböző kombinációi változatos lehetőségekkel kecsegtetnek. Ezeket összefoglalólag szinergikus rendszereknek nevezik.

A hasadási-fúziós hibrideket és a fúziós hasadóanyag-tenyésztést már áttekintettük. A nyalábtechnika és a hasadási reaktorok kombinációja is lehetővé teszi a hasadóanyag-tenyésztést, de ezen túlmutató lehetőségek is rejlenek benne. Felmerült például, hogy a radioaktív hulladékot neutronbesugárzásnak tegyük ki, és így a hosszú felezési idejű termékeket és a transzuránokat rövid felezési idejűvé alakítsuk át. Ezzel rövid idő alatt megszüntethetjük radioaktivitásukat. Ha nem a hulladékot, hanem rögtön az elhasznált üzemanyagot sugározzuk be, akkor benne egyrészt elpusztíthatjuk a hasadási termékeket, másrészt a tenyésztőtopokat hasadókká alakítjuk. Ezt üzemanyag-fiatalításnak is nevezhetjük, a megfiatalított üzemanyag elvileg visszavihető a hasadási reaktorba. Ezt jelentik a spallációs-hasadási hibridek.

A nyalábtechnikának a fúzióval is van kombinációja. Eszerint a fúziót plazmába belőtt nyalábokkal valósítjuk meg. Például deu-



térium és trícium keverékét tartalmazó plazmába deuteronnalábot lövünk be.

Végezetül még egy elképzelés: a hasadási reaktorok hulladékának radioaktív bomlása során felszabaduló energia lézerenergiává alakítható át, amit esetleg fúziós rendszerekben lehetne hasznosítani.

Összefoglalólag: a neutronokkal dolgozó energiatermelő folyamatok közép- és hosszútávú alkalmazásokkal kecsegtetnek. Mivel a gazdaságosan kibányászható hasadóanyag-mennyiség korlátozott, középtávon elkerülhetetlennek látszik a gyorsreaktorokban való üzemanyag-szaporítás. A távolabbi jövő energiatermelő rendszerei viszont várhatóan komplex szinergetikus rendszerek lesznek, melyek az energiát sok részrendszer organikus együttműködését kihasználva, a felhasználók számára legelőnyösebb módon fogják szolgáltatni. A magfizikai folyamatok, illetve berendezések széles — talán teljes — körét felhasználó szinergetikus rendszerek, ha megvalósulnak, némi esztétikai kárpótlást nyújtanak azoknak, akik ma még jogosan elégedetlenséget éreznek a nukleáris energiatermelő berendezésekben lezajló magfizikai reakciók eleganciája és a műszaki megoldások nehézsége okozta diszharmonióban.

Óriási kutatási és fejlesztési erőfeszítéseket tesz a világ a nukleáris energetika területén. Elégedettebbek lennénk, ha ezekből az erőfeszítésekből lényegesen több jutna a szinergetikus rendszerekre, és ha már az egyes alrendszerek hatásfokáról és gazdaságosságáról is tudnánk legalább prognózisokat készíteni. Már az is döntő jelentőségű lépés lenne, ha a szinergetika a hasadási termékek kezeléséhez adna hozzájárulást a felezési idők lerövidítése révén, megoldást kaphatnánk ezzel egy nyugtalanító problémára, amely a magenergetika jövőjét döntően befolyásolja.

Visszatérve a jelenhez: a magenergetika feladatainak megoldásán magyar kutatók is munkálkodnak.

A nyomottvizes termikus reaktorok pontos fizikai leírását szolgáló modell kialakítása már a befejezéshez közeledik a ZR-6 kutatások keretében. Már is sok figyelemreméltó eredményt hoztak a tokamak-rendszeren folyó plazmadiagnosztikai kutatások. Gyorsreaktorokból és termikus fissziós reaktorokból álló együttműködő energetikai rendszerek viselkedésére vonatkozó tanulmányokat végzett és végez Lévai András munkatársaival.

Ezek a példák azt igazolják, hogy egy kis országban sem szabad automatikusan elvetni a „big science” művelését, mindazonáltal a témaválasztás nagyon gondos tervezést és nemzetközi együttműködést kíván.

### Irodalom

1. The Collected Works of Leo Szilárd. Scientific Papers. Eds.: FELD, B. T.—WEISS SZILARD, G. MIT Press, London-Cambridge, 1972
2. Az 1980. április 8—11. között Lausanne-ban rendezett „Second International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems” c. konferencia dolgozatai. Atomkernenergie/Kerntechnik, **36** (1980) No. 3.
3. J. BUSSAC—P. REUSS: Traité de neutronique. Hermann, Paris, 1978.



# Neutronok a laboratóriumi és az ipari aktivációs analitikában

Szabó Elek—Bakos László

MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

## Bevezetés

Hevesy György 1936-ban végzett első aktivációs [1, 2] analízise óta a módszer széles körben elterjedt. Nagy neutronfluxusú atomreaktorokban végrehajtott neutronaktivációs elemzés a nyomelemek mennyiségi meghatározásának egyik legjobb módszere.

A módszer biztosította technikai lehetőség gyorsan taláلكozott a nyomelemek szerepe iránt világszerte megtalálható érdeklődéssel. Ez az érdeklődés magával hozta, hogy a neutronaktivációs analízist (NAA) széleskörűen alkalmazták és alkalmazzák a tudományos kutatás és az ipari gyártási eljárások különböző területein:

- félvezetők, színesfémek és acél gyártásellenőrzésében,
- kriminológiai, archeológiai és geológiai kutatásokban,
- orvosi kutatásokban,
- mezőgazdaságban (talaj- és növényvizsgálatokban),
- környezetvédelemben.

Az atomreaktorok mellett az aktivációs analízis céljára használt más neutronforrások — például a radioaktív izotópforrások, neutrongenerátorok — a helyszíni analíziseket igénylő bányászati, mezőgazdasági vizsgálatokra és az ipari gyártási folyamatok ellenőrzésére és szabályozására is lehetőséget adnak.

A hazai műszaki és természettudományi kutatások analitikai igényei számos kutató érdeklődését felkeltették az aktivációs analízis iránt.

A Központi Fizikai Kutató Intézetben 1959-ben üzembe helyezett VVR-Sz típusú reaktor lehetőségeihez ( $2 \cdot 10^{13}$  neutron  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) jelentős mértékben járult hozzá az a támogatás, amit a

1. táblázat. Neutronaktivációs analitikát művelő hazai kutatóhelyek

Intézet	Neutronforrás	Vizsgált anyagok
KFKI	reaktor, neutrongenerátor, radioaktív izotóppal kiváltott magreakció	félvezetők, fémek, biológiai anyagok
MFKI	reaktor	fémek
BME Alkalmazott Kémia Tanszék	reaktor	félvezetők, biológiai anyagok, környezeti anyagok
BME Tanreaktor	reaktor	környezeti anyagok, biológiai anyagok, geológiai anyagok
KLTE Kísérleti Fizika Tanszék	neutrongenerátor	régészeti anyagok
ELTE Kísérleti Fizika Tanszék	neutrongenerátor	biológiai anyagok
TKI	reaktor	félvezetők, tiszta anyagok
EIVRT	reaktor	félvezetők, fémek
ALUTERV-FKI	reaktor	alumínium
MAELGI	neutrongenerátor, radioaktív izotóppal kiváltott magreakció	geológiai anyagok
Dunai Vasmű	neutrongenerátor	fémek

Központi Fizikai Kutató Intézet vezetése mellett az Országos Atomenergia Bizottság és a Magyar Tudományos Akadémia Analitikai Bizottsága nyújtott. Személy szerint Erdey László akadémikus segítette elő nagymértékben a neutronaktivációs analitikai módszer hazai bevezetését és elterjedését (1. táblázat).

A következőkben a hazai munkákból vett példákkal szeretnénk bemutatni a neutronok néhány tipikus alkalmazását a laboratóriumi és ipari analitikában.

### Reaktor neutronaktivációs analitikai alkalmazásai

Hazánkban a Központi Fizikai Kutató Intézet VVR-Sz típusú kísérleti atomreaktora és a Budapesti Műszaki Egyetem tanreaktora biztosít reaktorneutronokat az aktivációs analitika céljaira.



I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			I	II	III	IV	V	VI	VII	O
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Ru
Fr	Ra	Ac															

Lantanidák

Ce	Pr	ND	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Aktinidák

Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



meghatározott elem

1. ábra. KFKI Analitikai Osztályán neutronaktivációs elemzéssel rendszeresen meghatározott elemek

A Központi Fizikai Kutató Intézet Analitikai Osztályán végzett aktivációs elemzéssel több mint 50 elemet határoztak meg különböző mintákban (1. ábra). Ezeket nem kívánjuk részletezni, csupán néhány tipikus feladaton mutatjuk be az elért eredményeket:

- szilícium nyomelemeinek meghatározásán [3, 4],
- geológiai (holdpor) minták kémiai összetételének vizsgálatán [5, 6],
- aktivációs analitikában használt összehasonlító mintákon [7, 8].

### A félvezető tisztaságú szilícium aktivációs analitikája

Ezzel az eljárással az egyik legkiterjedtebben vizsgált anyagrendszer a félvezető tisztaságú szilícium egykristály. A hazai vizsgálatok megkezdése gyakorlatilag egybeesik a neutronaktivációs analízis megindításával (1958—60).

2. táblázat. Félvezető-vizsgálatok céljára végzett mérések. Félvezető tisztaságú alapanyagok, segédanyagok vizsgálata NAA módszerrel

1. Alapanyagok	Vizsgálati cél	Technológiai kapcsolat	Együttműködés
Si	Bulk analízis  Adalékolt szennyezők diffúziós eloszlása (B, P, As, Sb) Adalékanyag- és szennyezőelem-eloszlásprofilok epitaxiás implantált rétegekben Szennyezőelem-eloszlások vizsgálata felületi eloszlás $\text{SiO}_2$ rétegekben, $\text{Si}_3\text{N}_4$ rétegekben, $\text{Si}_3\text{N}_4\text{—SiO}_2$ rétegszerkezetekben	Egykristály-előállítás  Doppolt egykristály-előállítás, diffúzió  Epitaxiás rétegnövesztés Ionimplantáció  Oxidációs tech. fejlesztés Szilícium-nitrid zárórég előállítás	TKI, EIVRT, VKI, Fűzfő NKV TKI, EIVRT  TKI KFKI, HIKI  TKI HKI
GaAs, GaP, GaAsP ZnS	Bulk analízis [Hg, Au, Cu, Mn, Cd, Co, (Zn), Se, Te]	Egykristály-előállítás	KFKI, MFKI
2. Segédanyagok	Vizsgálati cél	Technológiai kapcsolat	Együttműködés
$\text{SiHCl}_3$ , $\text{SiCl}_4$ $\text{NH}_4\text{F}$ Víz „Aerosyl” $\text{SiO}_2$	Szennyezőelem-analízis Szennyezőelem-analízis Szennyezőelem-analízis Szennyezőelem-analízis	Desztillációs tisztítás	TKI KFKI TKI, KFKI TKI



A vizsgálati módszer potenciális lehetőségeit a témában érdekelt szinte valamennyi hazai intézmény felismerte, és velük a Központi Fizikai Kutató Intézet az elmúlt időszakban anyagvizsgálati, illetve kutatási és tudományos együttműködést folytatott és folytat ma is (Egyesült Izzólámpa és Villamossági Részvénytársaság, Távközlési Kutató Intézet, Műszaki Fizikai Kutató Intézet, Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet).

A félvezető-alkatrész technológia fejlődésével változtak a vizsgálati igények és ennek megfelelően speciális vizsgálati technikák is megvalósultak.

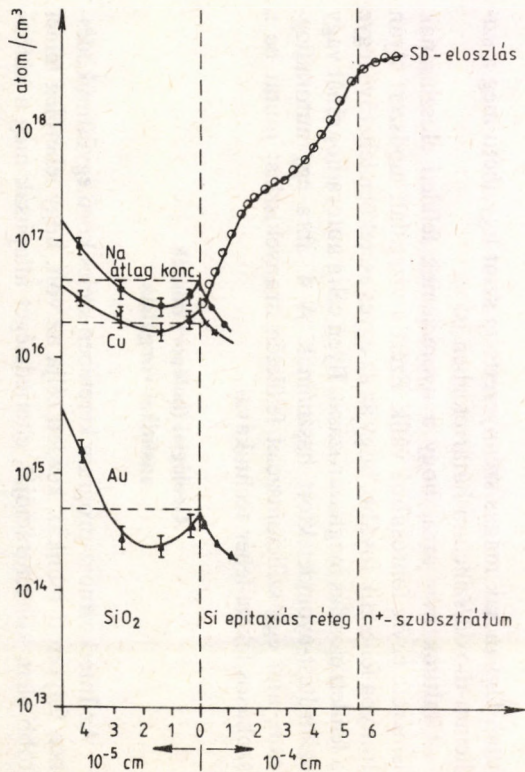
A vizsgált fontosabb anyagrendszereket, a mérés célját és alkatrészfejlesztés kapcsolatát a 2. táblázatban mutatjuk be. Amint az a táblázatból megfigyelhető, az alkatrésztechnológia fejlődésével az analitikai információigény technológiacentrikussá vált, és egyre inkább a kristályszelet felületi, illetve felületközeli tartományából vartak adatokat.

A nagy tisztaságú alapkristályt a gyártó cégek ma már garantálják. Ezek kifogástalan minőségét csak a technológia helytelen vezetésével, illetve nem kielégítő tisztaságú segédanyagokkal lehet elrontani. Ezt felismerve a kutatók neutronaktivációs analitikai vizsgálati módszereket dolgoztak ki a szennyező elemek koncentrációeloszlásának vizsgálatára szilícium bázisú felületi és vékonyrétegekben.

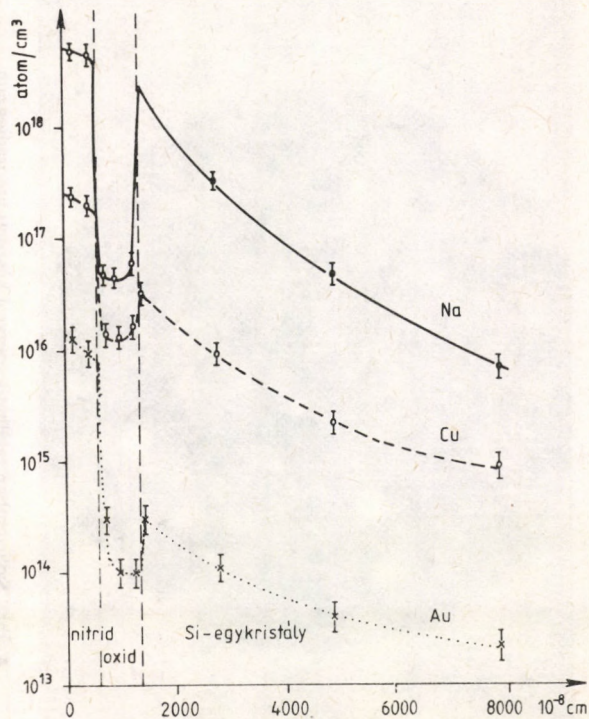
A rétegleoldással kombinált vizsgálati lehetőségeket illusztráljuk egy szilícium-dioxid/szilícium epitaxiális réteg/szilícium szubsztrátum felépítésű minta mérési eredményeivel. A 2. ábrán egy körülbelül 480 nm vastag szigetelő oxidrétegben előforduló nátrium, réz, arany szennyezők átlagkoncentrációját és eloszlását, az epitaxiális rétegben az antimon adalékanyag eloszlásprofilját figyelhetjük meg. Ez utóbbi profil egyben az epitaxiális rétegnövesztés folyamán végbement autodopolási effektusra is következtetni enged.

A 3. ábrán egy körülbelül 50 nm szilícium-nitrid/80 nm szilícium-dioxid/szilícium rétegrészlet mintájának vizsgálati eredménye látható (Központi Fizikai Kutató Intézet, Távközlési Kutató Intézet, Híradástechnikai Kutató Intézet együttműködése).

Szembetűnő a nitridréteg magas szennyezőelem-koncentrációja, ami a növesztéshez felhasznált ammónia nem kielégítő tisztaságára

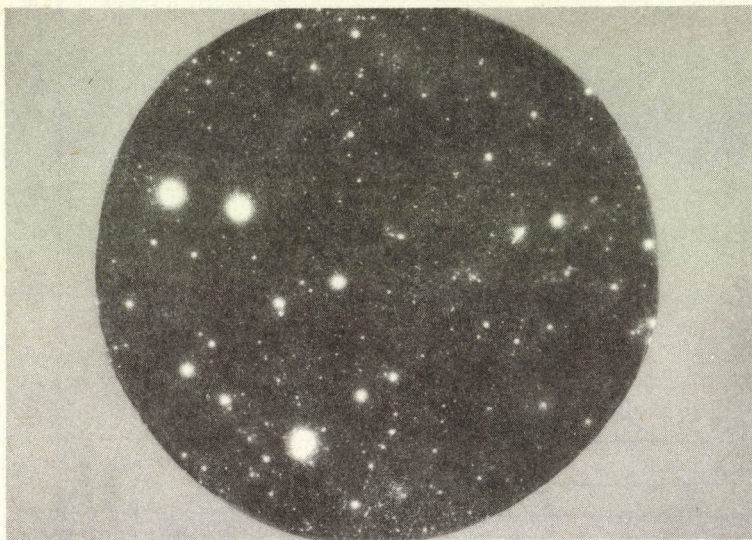


2. ábra. SiO<sub>2</sub>/Si epitaxiális réteg/Si minta antimon, arany, nátrium, réz elemzési eredménye



3. ábra. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si minta arany, nátrium, réz elemzési eredménye





4. ábra. Szilíciumban található aranyról készített autoradiogram

utal. Ugyancsak magas szennyezettségi szint figyelhető meg a szilícium-dioxid/szilícium határrétegben is.

Utaltunk már arra, hogy a nyomelemek felületi eloszlásának ismerete egyre fontosabbá válik. Ezért a vizsgálati módszert olyan irányba fejlesztik tovább, hogy az az egyes esetekben lehetővé tegye a felületi eloszlás meghatározását. Ilyen célra autoradiográfiát vagy szilárdtest-nyomdetektort használnak. A 4. ábra egy autoradiogram, ami egy szilíciumszelet felületén aranyeloszlást mutat be a szokásos fekete-fehér technikával.

#### **Geológiai (holdpor) minták analitikai vizsgálata**

Az Interkozmosz-program keretében széles körű együttműködésben folytatott munkák kezdeti célja az volt, hogy lehetőleg minél több elem koncentrációját, elterjedtségét állapítsák meg a külön-

bőző holdmintákban. Ezekhez a vizsgálatokhoz a legkülönbözőbb analitikai módszereket alkalmazták. A felhasznált módszerek kimutatási határai és érzékenységei alapján azonban az aktivációs analízis és a tömegspektrometria döntő szerepet játszott a vizsgálatokban. A későbbiekben a holdfelszín jobb megismeréséhez, illetve a különböző keletkezési elméletek megítélésére már az egyes ásványok szemcséinek, s általában a minták finomabb, apróbb részleteinek összehasonlító vizsgálata került előtérbe.

A Központi Fizikai Kutató Intézet a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának Geokémiai és Analitikai Kutató Intézetétől 1981 végén 29 mintát kapott aktivációs analitikai vizsgálatokra. Ezeket a mintákat a Luna 16, 20 és 24 automatikus űrállomások gyűjtötték. A vizsgálatra kapott minták a Hold különböző területeiről származnak: a Termékenység tengere (Mare Fecundalis) sík vidékéről (Luna 16), a Viharok óceánja (Mare Crisium) és a Termékenység tengere közötti hegyvidékről (Luna 20), a Termékenység tengere egyik kráteréből (Luna 24).

A mintákat a 370 és 2 nm szemcseméret közötti tartományban hét frakcióra bontották. Az elemeknek, különösen az illékonyabb elemeknek a durvább, illetve finomabb szemcseméretű frakciók közötti eloszlása alapján a talaj kialakulására (pl.: elemek kicsapódása, kőzetek utólagos felaprózódása) lehet adatokat kapni. Az adatokból következtetések vonhatók le és összehasonlító vizsgálatok végezhetők a különböző jellegű holdfelületek keletkezési viszonyaira is.

A Központi Fizikai Kutató Intézetben méréseket végeztek azoknak az elemeknek a meghatározására, amelyek a reaktorban végzett aktiválás során rövid, néhány perc felezési idejű izotópokat adnak. A mintában keletkezett aktivitás gyors mérését a reaktorba beépített pneumatikus csőposta teszi lehetővé. Az Intézetben követett eljárás: 0,5 perc aktiválás és 15 perc hűtés utáni aktivitásmérés. A holdmintákban így határozták meg az alumínium- (7,1%), mangán- (0,17%), nátrium- (0,28%), króm- (0,22%), vas- (14,3%), kobalt- (32,5 µg) tartalmat. A minták ritkaföldfém-tartalmának meghatározására 10 órás besugárzás után a mintákat feloldották, a radioaktív elemeket lantán-oxalát csapadékon megkötötték, és mérték. A holdmintákban meghatározott elemeket a 3. táblázat tartal-

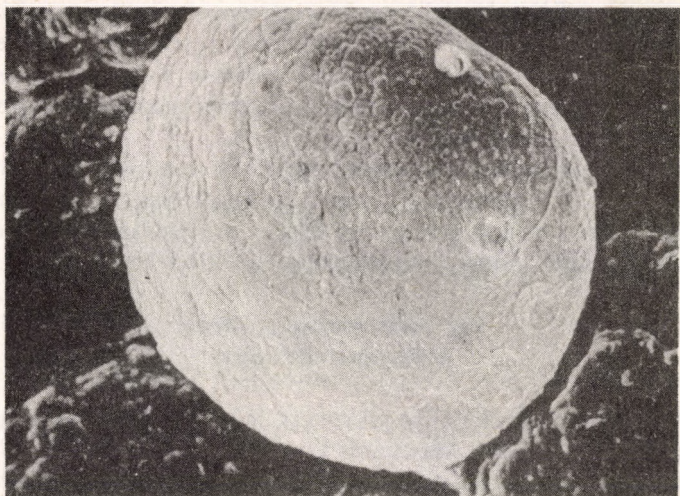


3. táblázat. Holdminták ritkaföldfém-tartalmának neutronaktivációs analízise

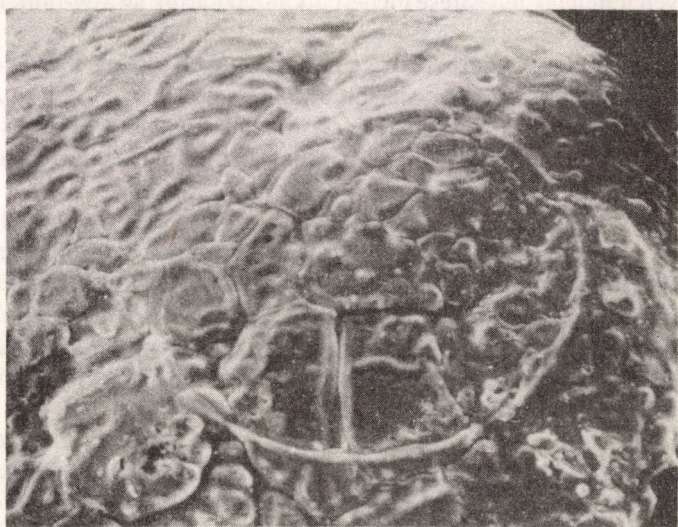
Elem	Meghatározáshoz használt		
	izotóp	csúcs, keV	koncentráció, ng/g
La	$^{140}\text{La}$	486,8	$12,2 \pm 0,4$
		815,5	
		1595,4	
Ce	$^{141}\text{Ce}$	145,4	$13,4 \pm 1,4$
Pr	$^{142}\text{Pr}$	1575,5	$4,6 \pm 2,5$
Nd	$^{147}\text{Nd}$	91,4	$25,4 \pm 2,5$
Sm	$^{153}\text{Sm}$	103,2	$8,5 \pm 0,3$
Eu	$^{152m}\text{Eu}$	841,6	$2,20 \pm 0,11$
	$^{152}\text{Eu}$	344,2	
Gd	$^{159}\text{Gd}$	363,5	$7,3 \pm 1,2$
Tb	$^{160}\text{Tb}$	298,6	$1,6 \pm 0,2$
Ho	$^{166}\text{Ho}$	80,6	$1,9 \pm 0,2$
Er	$^{171}\text{Er}$	308,1	$5,5 \pm 0,6$
Yb	$^{175}\text{Yb}$	282,6	$6,0 \pm 0,3$
		396,1	
Lu	$^{177}\text{Lu}$	208,4	$0,86 \pm 0,05$

mazza. A kis mennyiségben (néhány mg) rendelkezésre álló mintáknál a vizsgálati eljárások ellenőrzésére párhuzamosan standard referenciaanyagokat is elemeztek. Ezek az Egyesült Államok-beli National Bureau of Standards BRC 1 bazalt, GSP 1 grandolinit készítményei voltak.

Az aktivációs analitikai meghatározásokat pásztázó elektronmikroszkóppal (JEOL 35 A) végzett vizsgálatok egészítik ki. A holdtalaj mikroszkópos tanulmányozásához egy különleges, a kozmokémikusok által egyedinek tartott szemcsét sikerült találni. A szemcse átmérője hozzávetőlegesen 600 nm, és — amint az 5. ábrán is látható — kissé lapított gömb az alakja. A mintán a megolvadt felületek jól felismerhetők. A felvételen láthatók olyan nyomok is, amelyekből arra lehet következtetni, hogy az egykori forró, képlékeny szemcséből gázbuborékok jöttek a felszínre, majd elpattantak, és ennek nyomai megmaradtak a szemcsén. Az olvadt területeket nagyobb nagyításban ( $2000\times$ ) is mutatja a 6. ábra.



5. ábra. Holdpormintából kiválasztott szemcse



6. ábra. Az 5. ábra részlete (2000-szeres nagyításban)



A szemcse felületén elektronokkal gerjesztett röntgensugarak segítségével vizsgálták a minta összetételét. A mérésekhez a Princeton Gamma-Tech. Incorporation energiadiszipatív röntgenfluoreszcencia-mérő berendezését használták. A szemcsehatárokon jól azonosítható volt a kénfeldúsulás.

Az 5. ábrán látható szemcsében egyes részeket vas—nikkel ötvözetként (3—5% nikkeltartalommal) azonosítottak. A bemutatott példa is bizonyítja, hogy egy-egy feladat megoldásánál több, egymást kiegészítő módszer alkalmazása rendkívül hasznos.

### **Egy mérés technikai probléma: az összehasonlító minta**

A módszer művelői előtt jól ismert, hogy az aktivációs analízis kiértékelésénél elvileg két eljárás követhető: az abszolút és relatív kiértékelés. Ha az aktivációs analitikai tárgyú irodalmi közleményeket nézzük, szembetűnő, hogy a relatív kiértékelési eljárást használják leggyakrabban. Megértjük ezt a tényt, ha megvizsgáljuk milyen feltételek teljesítése mellett alkalmazhatjuk az abszolút, illetve relatív kiértékelési eljárást.

Az aktivációs elemzésnél az abszolútnak nevezett kiértékelési eljárás alkalmazásához ismernünk kell:

- a mérődetektor határfokát az energia függvényében,
- a spektrumban a meghatározandó izotóphoz tartozó gamma-vonal abszolút intenzitását,
- a besugárzó neutronfluxus abszolút értékét és energiaeioszlását, valamint abszolút effektív aktivációs hatáskeresztmetszetét.

Az abszolút módszer legnagyobb nehézsége, hogy az effektív aktivációs hatáskeresztmetszetet és a gamma-intenzitást az irodalomból általában 5—20%-os pontossággal ismerhetjük. További nehézség, hogy a fluxus és az aktivitás abszolút mérése körülményes és nagyon precíz munkát igényel.

Az abszolút módszerrel végzett aktivációs analitikai vizsgálatok pontossága általában elmarad a relatív módszerrel végzett vizsgálatoké mögött. A relatív kiértékelési módszerrel végzett mérések esetén a vizsgálandó mintával együtt a meghatározandó elem ismert mennyiségű etalonját is besugározzuk.

A relatív módszer alkalmazásánál szükségtelen a nukleáris állandók, valamint az aktivitások abszolút meghatározása vagy ismerete, mert összehasonlító aktivitásméréseket végzünk.

Az összehasonlító módszerből adódik, hogy alkalmazásánál csak azokra az elemekre kaphatunk mennyiségi adatokat, amelyekre előzetes vizsgálataink, ismereteink alapján már számítunk. Ez azt is jelenti, hogy annyi összehasonlító mintát kell készítenünk, ahány elemet meg akarunk határozni. Amennyire egyszerűnek tűnik ez a mérések megtervezésénél, annyira nehézkes a mérések gyakorlati kivitelezésénél.

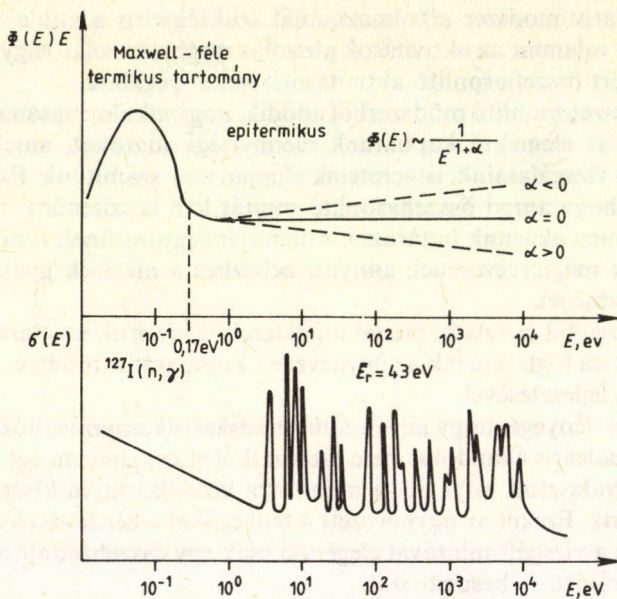
Az abszolút és relatív mérési módszerek előnyeinek megtartására, fokozására foglalkoztak az úgynevezett komparátor módszer kutatásával, fejlesztésével.

Ennek lényege, hogy az abszolút módszer alkalmazásához szükséges nukleáris állandókat nem táblázatból veszik, hanem egy alkalmasan választott anyagra, a monitorra vonatkoztatva kísérletileg megméri. Ezeket az úgynevezett  $k$  tényezőket a kérdéses elemekre ismerve a vizsgált mintával elegendő csak egy összehasonlítót — a komparátort — besugározni.

Az eljárást több aktivációs analitikával foglalkozó laboratórium is bevezette, széles körű elterjedésére azonban nem került sor. Ennek oka az volt, hogy a kísérletileg mért  $k$  tényezők csak egy adott mérőrendszerre és neutronfluxus-eloszlásra voltak érvényesek. Ezt a hátrányt sikerült a Központi Fizikai Kutató Intézet kutatóinak a ghenti egyetem kutatóival együttműködve kiküszöbölni egy újabb, az úgynevezett  $k_0$  standardizációs módszer kidolgozásával. Ezt a  $k_0$  konstanst körülbelül 1% pontossággal sikerült megmérniük közel 90 radioaktív izotópra.

A besugárzásnál keletkező aktivitás számításánál jelentős termikus és epitermikus neutronfluxus-eloszlás mérésére kidolgozták a cirkónium—arany monitor módszert ami az eddigi eljárásoknál egyszerűbb és pontosabb. A 7. ábra egy reaktor tipikus neutronfluxus-eloszlását és a  $^{127}\text{I}(n, \gamma)$  reakció hatáskeresztmetszet—energia görbét mutatja. A gyakran nagy számban jelentkező neutronrezonanciák figyelembevételére bevezették az effektív rezonanciaenergia ( $\bar{E}_r$ ) fogalmát. Az egyes magreakciókra jellemző  $\bar{E}_r$  értéke-





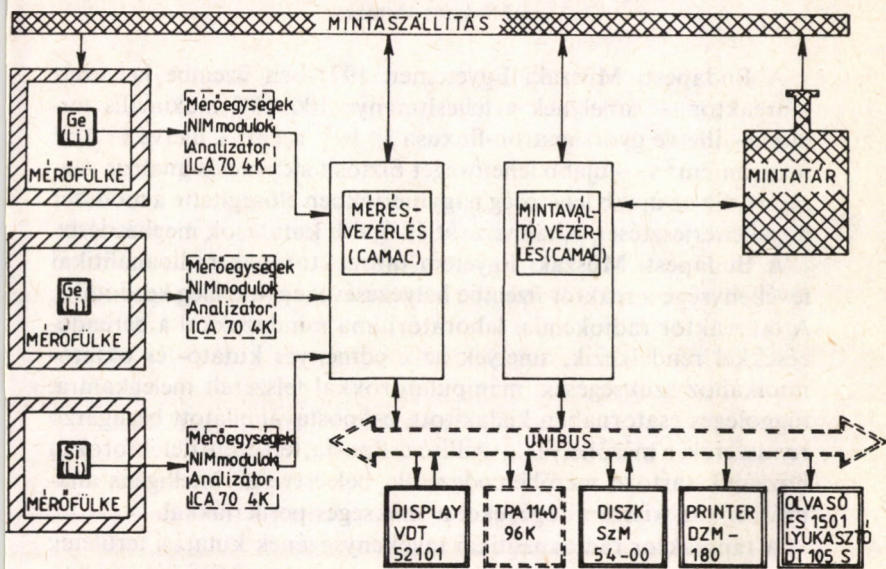
7. ábra. Neutronfluxus-eloszlás és  $^{127}\text{I}(n, \gamma)$  reakciójának hatáskeresztmetszet—energia összefüggése

ket eddig mintegy 100 radioaktív izotópra határozták meg számítással vagy méréssel.

A gamma-spektrumok mérésére ma már szinte kizárólag germánium félvezető detektorokat használnak. Ezek kalibrálása és hatásfok—energia görbéjének pontos meghatározása alapvető fontosságú. A gyakorlatban tetszőleges minta—detektor távolságban pontforrástól eltérő geometriájú minták mérésére gyakran szükség van. Olyan új, automatikus eljárásokat dolgoztak ki az abszolút hatásfok számítására, amelyek figyelembe veszik a geometriai tényezők mellett a minta gamma-abszorpcióját is.

A  $k_0$  standardizációs módszer alkalmazásával is megvalósítható a teljesen automatizált gamma-spektrometria. A Központi Fizikai Kutató Intézetben befejezés előtt áll egy ilyen rendszer építése, amelynek vázlatát a 8. ábrán mutatjuk be. A rendszerben használt

# REAKTOR AKTIVÁCIÓS ANALITIKAI MÉRŐKÖZPONT



8. ábra. Reaktoraktivációs analitikai mérőközpont

számítógép, CAMAC egységek, mintaváltó az intézetben készültek.

A besugárzott mintákat és monitorokat a számítógépes vezérlésű rendszer továbbítja a mérőfülkébe. A sokcsatornás analizátorokkal mért gamma-spektrumokat egy TPA 1140 számítógép háttértárolója őrzi meg. Az elemek koncentrációjának számításához szükséges  $k_0$  tényezőket és egyéb nukleáris adatokat egy nukleáris adatkönyvtár tartalmazza. Ugyancsak mágneslemez tárolja a kiértékeléshez szükséges programokat.

A  $k_0$  standardizációs módszert jelenleg rutinszerűen használjuk több vizsgálatnál, így a félvezető tisztaságú szilícium, alumínium-oxid kerámiák és kriminalisztikai célú hajvizsgálat esetén.



## Budapesti Műszaki Egyetem tanreaktora melletti aktivációs elemzés

A Budapesti Műszaki Egyetemen 1971-ben üzembe helyezett tanreaktor — amelynek a teljesítménye 100 kW, maximális termikus-, illetve gyorsneutron-fluxusa  $1 \cdot 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup> s, illetve  $5 \cdot 10^{11}$  neutron/cm<sup>2</sup> s — újabb lehetőséget biztosít aktivációs analízis végzésére. Ez az újabb lehetőség nagymértékben elősegítette a módszer hazai elterjesztését, alkalmazását és újabb kutatások megkezdését.

A Budapesti Műszaki Egyetem tanreaktorának radioanalitikai tevékenysége a reaktor üzembe helyezésével egyidejűleg kezdődött. A tanreaktor radiokémiai laboratóriuma mindazokkal a berendezésekkel rendelkezik, amelyek az eredményes kutató- és oktatómunkához szükségesek: manipulátorokkal felszerelt melegkamra, függőleges csatornában kialakított, csőpostával ellátott besugárzó rendszerek, a mérőhelyekig szállító csőposta, félvezető detektorok, a hozzájuk tartozó mérőberendezések, beleértve az intelligens analizátorokat, kisszámitógépeket a szükséges perifériákkal.

A tanreaktor radioanalitikai tevékenységének kutatási területei: az atomerőművek radioanalitikája és a neutronaktivációs analízis [9].

Az atomerőművek radioanalitikája keretében foglalkoznak a primerköri hűtőközeg radioaktív elemeinek (izotópjainak) szakaszos és folyamatos meghatározásával és a levegővel kibocsátott sugárzó termékek szelektív mérésével.

A neutronaktivációs analízist felhasználják környezetvédelmi vizsgálatokban és geológiai, biológiai és régészeti minták elemzésére. A felsorolt vizsgálatokban használt eljárásaikat, illetve azok megbízhatóságát standard referenciaanyagok elemzésével ellenőrzik.

A Budapesti Műszaki Egyetem Alkalmazott Kémia Tanszékén több mint tíz éve folyó aktivációs analitikai vizsgálatok roncsolásos és roncsolásmentes meghatározásokra egyaránt kiterjednek. A kutatási-fejlesztési munkák mind a kémiai elválasztási rendszerre, mind a nukleáris mérési, adatgyűjtő és adatfeldolgozó rendszer kialakítására irányultak [10].

A megvalósított kémiai elválasztási rendszerben félautomatikus üzemmódban valósítható meg a minták feltárása, reaktív lepárlása,

4. táblázat. NBS 1633a sz. pernyeminta elemzési eredményei

Elem	Mérések középértéke	Középérték relatív hibája	Bizonylati érték	Bizonylati és középérték rela- tív eltérés, %
As	141	0,6	145 ± 15	0,3
Ce	140	30	180	22
Co	41	7	46	10
Cr	170	12	196 ± 6	13
Cs	10	20	11	9
Eu	3,6	20	4	10
Ga	55	9	58	5
Hg	6	17	7,6	20
La	78	5	—	—
Mn	190	2	190	0
Rb	127	6	131 ± 2	3
Sb	5,4	6	7	22
Sc	35	6	40	13
Se	11	9	10,3 ± 0,6	7
Sm	15	13	—	—
Th	23	9	24,7 ± 0,3	7
V	290	1	300	3
Ba	0,11	10	0,15	27
Fe	9,4	3	9,4 ± 0,1	0
K	1,70	2	1,88 ± 0,06	10
Na	0,15	7	0,17 ± 0,01	12
Ti	0,80	13	0,8	0

a mátrixelemek eltávolítása szelektív szorbensek segítségével és a komponensek elválasztása. Az elválasztandó elemek csoportjait ioncserélő gyantákon gradiens elúciós technikával választják el. A műveletek inert atmoszférában is végrehajthatók. Kidolgozták különböző, kereskedelmi forgalomban nem, vagy csak nehezen hozzáférhető szervesetlen szorbensek (hidratált antimon-pentoxid, cirkónium-foszfát, titán-foszfát) előállítási és minősítési eljárásait.

Megépítették a kémiai feldolgozó rendszer egyik helyszíni vizsgálatokhoz telepíthető változatát, amelynek elemeit egy 50 cm × 40 cm × 40 cm nagyságú műanyag dobozban helyezték el. A szerkezeti elemek a kémiai feladat jellegének megfelelően modulszerűen kapcsolhatók össze. Programadó segítségével a kémiai feldolgozást teljesen automatizálni lehet.



A kémiai elválasztási rendszert sikerrel alkalmazták a Levegőtisztaságvédelmi Intézet megbízásából végzett aeroszol elemzéseknél. A vizsgálatok kiterjedtek a levegő szilárd szennyezői fő-, mellék- és nyomkomponenseinek mennyiségi meghatározására. Az alkalmazott mérési módszer teljesítőképességét a National Bureau of Standards szálló szénhamu (coal fly ash) standard referenciaanyagának elemzésével ellenőrizték. Az elemzési eredmények és a National Bureau of Standards bizonylati értékei a 4. táblázatban láthatók 18 elemre.

A levegőszennyező forrás és a környezeti mérőhelyek mintáinak elemzési eredményei alapján statisztikai eljárásokat javasoltak a szennyező források azonosítására, és két számítási lehetőség alkalmazását a Komlói Hőerőmű mintáin mutatták be.

### **Neutrongenerátoros aktivációs analitika alkalmazásai**

A neutrongenerátorokra alapozott aktivációs analízissel jól meghatározható elemeket a reakció kis hatáskeresztmetszete és az analízis során a mérésre felhasznált radioaktív izotóp rövid felezési ideje jellemzi. A bevezető utalásokból adódik, hogy a neutrongenerátoros aktivációs analízist azokban az esetekben célszerű felhasználni, amikor:

- nincs zavaró elem, vagy annak hatása egyszerűen kiküszöbölhető,
- az elemzés gyorsasága elengedhetetlen,
- az egyszerű mintaelőkészítés nagyon előnyös,
- ha a rendelkezésre álló egyéb módszerek végrehajtása nehézkes a meghatározandó elem kémiai kötése miatt,
- könnyen automatizálható módszerre van szükség, pl. sorozatvizsgálatok esetén,
- a vizsgált minta további vizsgálatának lehetősége érdekében roncsolásmentes módszerre van szükség.

A neutrongenerátorral végezhető aktivációs elemzéseket más, azonos célra használt eljárásokkal összehasonlítva könnyű belátni, hogy ez a módszer nagyon előnyösen alkalmazható a nemfémek

elemek, különösen az oxigén meghatározására. A Központi Fizikai Kutató Intézetben ezen a területen folytatott munka során számos fém, illetve ötvözet (vas és ötvözei, alumínium és ötvözei, nióbbium-titán ötvözetek stb.) oxigéntartalmát határozták meg.

Az elemzésekhez szükséges gyors neutronokat az Intézetben épített NA-2 típusú neutrongenerátor segítségével állítják elő. Az elemzésre kerülő mintákat a besugárzás helyére és onnan a mérőhelyre egy GP-1 jelű kettős, pneumatikus csőposta szállítja. Egyidejűleg történik a minta és a monitor szállítása. A radioaktivitás mérésére két alacsonyhatárú mérőhely áll rendelkezésre.

A minták radioaktivitását NaI(Tl) szcintillációs detektorokkal mérik. A jelfeldolgozó rendszer egy elem meghatározására alkalmas célberendezésnél négy darab egysatornás amplitúdóanalizátorból áll. Multielemes analízisekhez egy, a Központi Fizikai Kutató Intézet által gyártott ICA-70 4K sokcsatornás analizátort használnak. A mérések értékelése HP-97/S programozható kalkulátorral történik.

Az acélglyártás folyamán a karbon kiegészítésére szükséges oxigén feleslegben kell alkalmazni. A felesleg azonban egy bizonyos határon túl rontja a fém mechanikai tulajdonságait. Ezért az acélt a gyártás befejező periódusában dezoxidálni kell. A művelet megfelelő végrehajtásán nagymértékben múlik a készgyártmány oxigéntartalma, és ezzel az oxigén okozta belső hibák jellege, mértéke. Ezért lényeges az oxigéntartalmat a dezoxidáció során mérni, mint ez a Dunai Vasműben hasonló módon történik.

Az alumínium félgyártmányokkal és gyártmányokkal szemben támasztott egyre növekvő igények a nemfémes szennyezők (pl. oxid) minimálisra csökkentését követelik a technológiáktól. A legkedvezőbb fémkezelési technológia kialakításához a termékek oxigéntartalmának ismerete szükséges. Az oxigénmeghatározások eredményeinek segítségével sikerült az oxigéntartalom változását nyomon követni az olvasztástól az öntésig, illetve az egyes fémkezelési eljárások hatását vizsgálni.

A neutrongenerátorral végzett aktivációs analitika igen alkalmas az acélokból kémiai, illetve elektrokémiai úton elkülönített zárványok oxigén-, szilícium- és alumíniumtartalmának elemzésére. Ugyancsak alkalmas az aktivációs analízisnek ez a vállfaja utólagos



aktiválással végzett nyomjelzés vizsgálatokra, amint ezt vasötvözetek zárványainak eredetére vonatkozó nyomjelzéses technikával végzett vizsgálatok is megmutatták. Ebben az esetben a nyomjelzésre használt elem bárium volt.

Újabban terjedőben van acélok ritkaföldfémekkel történő mikroötvözése és dezoxidálása. Az erre a célra alkalmazott cérium előötvözetek, illetve a cériummal ötvözött acélok cériumtartalma jó eredménnyel határozható meg neutrongenerátorral előállított gyors neutronokkal. Ezt a cérium e szempontból előnyös nukleáris tulajdonságai teszik lehetővé.

### **Zárt neutronforrással végzett aktivációs analízis alkalmazásai**

Az ilyen neutronforrások működése egy természetes vagy mesterséges radioaktív anyagból származó részecske segítségével kiváltott magreakción alapul, amelynek eredményeként kapjuk a neutron. Az ilyen típusú források közös jellemzője (a spontán hasadó kaliforniumtól étekintve) az alacsony neutronhozam, legalábbis a reaktornál, illetve neutrongenerátoroknál rendelkezésre álló neutronhozamhoz viszonyítva. Az alacsony neutronhozam következménye, hogy ilyen típusú neutronforrással végzett aktivációs analízisnél vagy a minta mennyiségét kell megnövelnünk, vagy csak olyan elemeket határozunk meg, amelyeknek neutronbefogási hatáskeresztmetszete nagy. További zavaró hatások forrása lehet, hogy a radioaktív izotópok segítségével előállított neutronnyalábot más természetű sugárzás is kíséri. A méréseknél ez a zajsztintet növelő tényezőként jelentkezik, és gyakran nem könnyű a neutronforrásoktól származó zajsztint csökkentése. A felsorolt nehézségek mellett is sok esetben hasznos lehet az aktivációs analitikának ez a változata, különösen ipari vagy mezőgazdasági célú helyszíni méréseknél. Ilyen helyszíni mérést gyakran követel az ásványi nyersanyagok bányászata [11].

A nyersanyagok kitermelésénél jelenleg a termék minőségének megállapítása a hagyományos nedveskémiai eljárások mellett nagyon nagy időállandóval — esetenként több mint 24 óra — történik. Ezért az operatív, minőségre orientált termelés tervezése a

közvetlen munkahelyi irányításban csak nagy késéssel érvényesülhet, ha egyáltalán érvényesül. Más lesz a helyzet, ha olyan kémiai analitikai eljárásokkal rendelkezünk, amelyek biztosítják a meghatározás kivitelezhetőségét a technológiai lépés végrehajtási idejénél rövidebb idő alatt.

Erre alkalmas analitikai eljárás a zárt neutronforrással végzett aktivációs analízis és az izotópperjesztésű röntgenfluoreszcens analízis. Az említett módszerekkel megoldhatják a különféle termelési ciklusokban jelentkező feladatokat:

- biztosítani a gyors és roncsolásmentes elemzés lehetőségét az ipari igényeket kielégítő pontossággal,

- lehetővé kell tenni a mérési eredmények gyors, számítógépes kiértékelését,

- biztosítani a termelést irányító központtal a kétirányú adatközlést.

A Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben (MÁEL-GI) kifejlesztett MTA 1527-2000 típusú ipari gyorselemző automata a vázolt feladat megoldásához nyújt segítséget.

A készülék alapvetően földtani alapanyagok alumínium-oxid, szilícium-dioxid, kalcium-oxid, titán-dioxid és vas(III)-oxid komponenseinek gyors, roncsolásmentes ipari igényeket kielégítő meghatározására alkalmas. Minimális emberi beavatkozást igényel, tehát szubjektív hibától mentes. A technológiai folyamat színhelyén telepíthető (pl. bányában). Eredményei az ipari folyamatszabályozásnál közvetlenül felhasználhatók.

A berendezést kezdetben bauxitok alumínium-oxid és szilícium-dioxid komponenseinek kvantitatív meghatározására és a timföldgyártás folyamatszabályozására használták. Az első ilyen típusú berendezést a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet 1966-ban az Ajkai Timföldgyárban helyezte üzembe. Az 5. táblázatból látható: az eltelt 16 év alatt az összes hazai bauxitbányában és timföldgyárban ez az analizátor folyamatosan napi három műszakban üzemel. Egyesek ipari laboratóriumokban, mások üzemi körülmények között működnek, legújabban pedig Halimba és Kincsesbánya esetében lenn a bányában üzemelnek. Jelenleg folyamatban van az alumíniumipar területén a berendezésre alapozott iparági szabvány bevezetése.



5. táblázat. MTA 1527-2000 alkalmazása elsősorban a hazai alumíniumipar és egyéb iparágak területén

Vállalat	Célfeladat	Vizsgált komponensek
Bakonyi Bauxitbánya	termelésirányítás, termelvény minősítés — termelt bauxitok minősítése külszíni ipari laboratóriumban — termelésirányítás közvetlen bányabeli információk alapján	Al, Si, Ca, Ti, Fe Al, Si
Féjér megyei Bauxitbánya	termelésirányítás, termelvény minősítés — termelt bauxitok minősítése külszíni ipari laboratóriumban — termelésirányítás közvetlen bányabeli információk alapján	Al, Si, Ca, Ti, Fe Al, Si
Ajkai Timföldgyár	timföldgyártás, bemenő bauxitok vizsgálata	Al, Si, Fe
Almásfüzitői Timföldgyár	timföldgyártás folyamatszabályozása — bemenő bauxitok vizsgálata — timföld vizsgálata — vörösiszap elemzés	Al, Si, Ca, Ti, Fe Al, Si Al, Si, Ca, Ti, Fe
Mosonmagyar- óvári Timföldgyár	timföldgyártás folyamatszabályozása — bemenő bauxitok vizsgálata — timföld vizsgálata — vörösiszap elemzés — tűzálló anyagok, különösen mullit minősítése	Al, Si, Ca, Ti, Fe Al, Si Al, Si, Ca, Ti, Fe Al, Si
Bauxitkutató Vállalat	mélyfűrészi magminták vizsgálata, bauxitkészlet becslés céljából	Al, Si
Fémipari Kutató	módszertani kutatás iparági technológiai folyamatok vizsgálata céljából. Bázislaboratórium	Al, Si, Ca, Ti, Fe
Cement és Mészművek Hejőcsabai Gyára	bemenő agyagalapanyagok minősítése	Si, Al, Fe, Ca
Salgótarjáni Síküveggyár	üveggyári folyamatszabályozás	Si, Na, Al, Fe

Az elmúlt évek fejlesztő tevékenysége során azonban az iparági igényekkel összhangban alkalmassá tették a kalcium-oxid, titán-dioxid és vas(III)-oxid meghatározására is. Ez utóbbi komponensek kvantitatív meghatározását az izotópperjesztésű röntgenfluoreszcens analízis mérési módszere alapján végzik.

A berendezés felhasználási köre az alumíniumipar területén túl is jelentősen bővült. Megoldották a cementipari agyagalapanyagok vizsgálatát. Folyamatban van a cementipar szempontjából fontos másik alapanyagnak, a mészkőnek a gyors elemzésével kapcsolatos feladatok megoldása. Ily módon az alapanyagoknak, továbbá a közbenső termékeknek — a nyerslisztnek és a klinkernek — vizsgálatával a cementgyártás teljes folyamatszabályozása elvégezhető.

Sikeres méréseket végeztek továbbá a szenek, valamint a hamualkotó komponensek vizsgálata területén is. Legújabb kutatások az erőművi pernye összetételének meghatározására irányultak. Alkalmazható a módszer szilikátipari analitikai feladatokban, pl. üveggyári folyamatszabályozás megoldásánál is.

A neutronaktivációs analitikai vizsgálatoknál a minták besugárzásához néhányszor  $10^7$  neutron/s hozamú gyűrű alakú Am—Be neutronforrást alkalmaztak.

Az  $^{241}\text{Am}$  radioizotóp hosszú felezési ideje (433 év) stabilis besugárzási feltételeket biztosít. A viszonylag kicsiny neutronhozam miatt elsősorban azok a komponensek aktiválódnak, amelyek nagy relatív gyakorisággal és nagy befogási hatáskeresztmetszettel rendelkeznek. Az említett felhasználási területen a mintákban elsősorban az alumínium és a szilícium aktiválódik számottevően. A két komponens szétválasztása besugárzási oldalon, neutronenergia-szelekcióval (termikus csatorna, gyors csatorna) valósítható meg. Mivel a neutronenergia-szelekció technikai lehetőségei korlátozottak, az interferencia megszüntetése nem tökéletes. A kettős aktiválás a két neutronterben és a keletkezett aktivitás elkülönített mérése lehetőséget nyújt a két elem koncentrációjának egyidejű meghatározására. Az eredményeket egy homogén lineáris egyenletrendszer legkisebb négyzetek módszerével történő megoldásával értelmezik.

Az alacsony neutronintenzitás miatt a kalcium, titán és vas komponensek ipari igényeket kielégítő vizsgálata a neutronaktivációs analízissel nem valósítható meg.



A felsorolt komponensek vizsgálatára az izotópgerjesztésű röntgenfluoreszcens analízis előnyösen alkalmazható.

A kalcium meghatározásánál gerjesztő sugárforrásként vas-55-öt, míg a vas meghatározásánál plutónium-238-at alkalmaznak.

A MTA 1527-2000 típusú alapkészülékbe épített röntgenfluoreszcencia mérőblokk automatikus időkiosztásban dolgozik. A mérési eredmények megjelenítése a neutronaktivációs analitikai mérőegységgel teljesen szinkronban üzemel. A mérőrendszer hitelesítési paramétereinek meghatározása után a berendezés a mérés befejeztével automatikusan kijelzi és nyomtatásban megjeleníti a felsorolt komponensek százalékos koncentrációértékeit. A termelésirányító számítógéppel összekapcsolva on-line üzemben működtethető.

A Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén az elmúlt 15 évben eredményesen foglalkoztak az iparban és a mezőgazdaságban jelentkező analitikai feladatok neutronfizikai módszerrel történő megoldásával. Az itt megvalósított készülékek és eljárások közül mutatjuk be a Bitatron és Klorotron nevű elemzési megoldásokat [12].

A Bitatron elnevezésű készülék az útépitésben használt aszfaltbeton bitumentartalmának neutronreflexiós módszerrel történő meghatározására szolgál. Az eljárás azon alapszik, hogy a bitumen az aszfalt egyéb alkotóival ellentétben számottevő arányban tartalmaz hidrogént, mely elemnek a termikus szórási hatáskeresztmetszete igen nagy, és így ha a vizsgálandó anyag különösen jó neutronabszorbenst nem tartalmaz, akkor a termikus neutronok detektálása révén mód van a hidrogéntartalom mennyiségi meghatározására. Az alkalmazott geometriai elrendezésben az útépitőiparban más célra is használatos, ún. Marshall-mintán — melynek átmérője 10 cm, magassága pedig 6,5—7,5 cm — végezzük el a mérést, melynek időigénye körülbelül 20 perc, az elérhető pontosság  $\pm 3$  súly% bitumen. A készülék kalibrálása standardmintákkal vagy az aszfalt összetevőinek — bitumen és ásványi anyagok — külön-külön történő mérése révén valósítható meg. Az elmúlt 10 évben a hazai iparvállalatok 15 db készüléket helyeztek üzembe, gyártásközi minőségellenőrzés céljaira.

A Klorotron nevű berendezés a Borsodi Vegyikombinát részére készült, klórozott polietilén klórtartalmának gyors, roncsolásmen-

tes módszerrel történő meghatározására. Mivel termikus neutronokra a hidrogén nagy szórási, illetve a klór nagy abszorpciós hatáskeresztmetszettel rendelkezik, a fenti elemeket számottevő mennyiségben tartalmazó minta környezetében a neutronteret döntően ezen elemek határozzák meg. A készülék Pu—Be neutronforrást és BF<sub>3</sub> termikus neutrondetektort tartalmaz, melyek egymás mellett, közvetlenül a minta közelében helyezkednek el. Tekintettel arra, hogy a vizsgálandó anyag hidrogéntartalma és klórtartalma között egyértelmű kapcsolat van, a számlálási sebesség a klórtartalommal fordítva arányos. A mérési pontosság  $\pm 0,5$  súly% klór, 10 perces mérési idő esetén.

### Neutronbefogásos (prompt) aktivációs analitika

A módszer a neutron elnyelését követő gamma-sugárzás mérésével mintegy 20 elem meghatározására ad lehetőséget (6. táblázat). A neutron elnyelése után  $10^{-14}$  s alatt kilépő gamma-sugárzást (vagy

6. táblázat. Néhány, prompt aktivációs elemzéssel kedvezően meghatározható elem

Elem	$E_\gamma$ , MeV
Hidrogén	2,23
Bór	0,477
	4,10
Szén	4,95
Klór	1,165
Titán	1,387
Króm	8,88
Vas	7,693
Szelén	6,586
Nióbium	0,695
Ródium	5,44
Kadmium	0,56
Gadolinium	0,079
Tantál	0,272
Higany	0,37



más részecskét) tekintjük „azonnali” válasznak. A módszer egyik jellemző sajátága, hogy a meghatározandó elemekből begyűjthető jelek mennyisége a mérési idővel egyenesen arányos. A mérés a besugárzással egyidőben történik olyan elrendezésben, hogy a detektor a besugárzó neutronnyaláb közvetlen közelében van. A mérési adatok a késő gamma-sugárzás mérésen alapuló aktivációs analitikában szokásos mérési és számítástechnikai eszközökkel nyerhetők, illetve dolgozhatók fel. A módszer előnyösen alkalmazható nagy nátrium-, kálium- vagy klórtartalmú minták elemzésénél [13].

Ez a technika ugyancsak sikerrel alkalmazható nitrogén meghatározására is. Erről a könyv Nagy Árpád által írt fejezetében található az olvasó további tájékoztatást.

## Irodalom

1. G. HEVESY—H. LEVI: Kgl. Danske Videnskab Selskab Math. fys. Medd. **14** (1936) 5.
2. G. HEVESY—H. LEVI: Kgl. Danske Videnskab Selskab Math. fys. Medd. **15** (1938) 11.
3. J. UPOR V.—ÖRDÖGH M.: KFKI Közlemények **12** (1964) 365.
4. E. SZABÓ: J. Radioanal. Chem. **19** (1974) 23.
5. L. BAKOS et al.: in The Soviet-American Conference on Cosmochemistry of the Moon and Planets (A conference held in Moscow, USSR, 1974). Eds.: J. H. POMEROY—N. J. HUBBARD. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C., 1977, p. 277.
6. CSAJKA M.—LAVRUHINA A. K.: Az aktivációs analízis alkalmazása a kozmikumokban. Meteoritok és holdminták analízise. (A kémia újabb eredményei 34. kötet. Szerk.: CSÁKVÁRI B.). Akadémiai Kiadó, Budapest, 1976.
7. A. SIMONITS—F. DECORTE—J. HOSTE: J. Radioanal. Chem. **24** (1975) 31.
8. A. SIMONITS et al.: J. Radioanal. Chem. **60** (1980) 461.
9. KEÖMLEY G.: magánközlés.
10. NAGY L. GY.: magánközlés.
11. MAELGI: MTA 1527-2000 típusú ipari gyorsselemező automata alkalmazása az ásványi nyersanyagok bányászatában és feldolgozásában. ELGI, Budapest.
12. CSIKAI GY.: magánközlés.
13. T. L. ISENHOUR—G. H. MORRISON: Anal. Chem. **38** (1966) 2.

# Neutronok és a természeti erőforrások kutatása

Fábiáncsics László

Központi Bányászati Fejlesztési Intézet, Budapest

## A kutatásban felhasznált kölcsönhatások és technológiai eljárások

A neutronok és az anyag közötti kölcsönhatások vizsgálatán alapuló különböző neutronfizikai módszerek ipari szempontból fontos alkalmazást nyernek a természeti erőforrások kutatásában.

Az egyszerre maximum 3 fázist tartalmazó kőzetek (szilárd kőzetváz, folyékony vagy gáznemű pórustartalom) vizsgálatánál a neutronforrásokból vagy neutrongenerátorból származó gyors neutronok lassulási és abszorbeálódási folyamatokon keresztül nyújtanak információt a kőzetek elemi és litológiai összetételére, a hidrogéntartalmon keresztül a porozitására, valamint a pórusokat kitöltő folyadék- vagy gáztartalomra. A természeti erőforrások, nyersanyagok kutatási fázisában a neutronfizikai módszereket elsősorban mélyfúrásokban alkalmazzák, ideértve a fúrásokból vett mintaanyag vizsgálatát is. A mélyfúrásokban végzett méréseknél a hazai gyakorlatban 40—300 mm közötti átmérőjű és rendszerint öblítő folyadékkal töltött fúrólyukak és az ezeket körülvevő kőzetek együttesen képezik a mérési teret. Ezzel a geometriai faktorialapú kapcsolatban jelentkezik a neutronok felhasználásának egyik általános kutatási jellemzője, miszerint az egyéb radiológiai módszerekhez viszonyítva nagyobb áthatolóképeség miatt átlagosan 20—70 cm sugarú vizsgálati térben alkalmasak a neutronok és kőzetek neutronfizikailag jellemző paramétereinek meghatározására. Így a módszer a gyakorlatilag mindig inhomogén kőzetek átlagosan jellemző adatait adja meg, és kevésbé érzékeny a fúrólyuk technológiával kapcsolatos zavaró hatásokra (átmérőváltozás, beléscsővezés stb.).



A neutronok energiájának megfelelően a neutronok és a közet között az alábbi kölcsönhatások zajlanak le:

- rugalmatlan szóródás,
- rugalmas szóródás,
- befogás.

Mivel rugalmatlan szóródás csak akkor lehetséges, ha a neutron energiája meghaladja a mag legalacsonyabb energiaszintjét, a fúrólukban geofizikai gyakorlatban használt 2—14 MeV neutron-energiák mellett a neutron csak kezdetben szenved el néhány rugalmatlan ütközést, majd energiáját rugalmas szórásokban elvesztve válik termikus, 0,025 eV energiájú neutronná és kerül radiációs befogásra. A rugalmas ütközésben átlagosan leadott

1. táblázat. Néhány elem neutronlassító képessége

Elem	Rendszám	Atomsúly	Rugalmas ütközések átlagos száma
H	1	1	18
He	2	4	43
Li	3	7	67
Be	4	9	86
C	6	12	114
O	8	16	150
Si	14	28	261
Sb	51	122	1115
U	92	238	2172

energia annál nagyobb, minél kisebb a szóró atommag tömege. Az 1. táblázat szemlélteti néhány elem neutronlassító képességét, az átlagban szükséges rugalmas ütközések számát ahhoz, hogy a 2 MeV energiájú neutron termikus energiára lassuljon [1].

A nyersanyagutakban előforduló kőzetekben a legkönnyebb elemek közül csak a hidrogén fordul elő számottevő mennyiségben, így a rugalmas energiaszóródás tartományában a kőzet hidrogéntartalma játszik döntő szerepet. A rugalmatlan szóródásnál keletkező és a radiációs befogásnál fellépő gamma-sugárzások számos elem kvantitatív meghatározását teszik lehetővé a kőzetekben.

Néhány elem esetében a termikus neutronokra vonatkozó anomáliásan nagy makroszkopikus befogási hatáskeresztmetszet jelent meghatározási lehetőséget (Li, B, Cl, Gd). Különösen az érc kutatásban használatos a neutronokkal történő aktiválás.

A neutronok és a kőzet közötti kölcsönhatásoknak megfelelően a fúrólukokban alkalmazott neutronszelvényezési módszereket az alábbi főbb csoportokra oszthatjuk:

1. energiaintegrációs neutronszelvényezések,
2. neutron-élettartam szelvényezés,
3. energiaszelektív neutronszelvényezések,
4. neutronaktivációs szelvényezések.

### Energiaintegrációs neutronszelvényezések

Ezek közé tartoznak a kutatásban legrégebben alkalmazott, de még ma is általánosan használt neutron—gamma, neutron—termikus neutron és neutron—epitermikus neutron szelvényezések. E módszerekkel alapvetően a kőzetek hidrogénatom-tartalmát vizsgálják. Amennyiben a kőzetváz gyakorlatilag nem tartalmaz hidrogént, a kapott adatok aránylag egyszerűen kalibrálhatók porozitás %-ra. A különböző típusú energiaintegrációs szelvényezések közül a legrégebb (a 40-es évektől már használt) a termikus neutronok radiációs befogásán alapuló neutron—gamma szelvényezés. Nagyobb porozitás érzékenységgű és mentes a gamma-sugárzás—anyag kölcsönhatási folyamatoktól a neutrontektálássú termikus neutron szelvényezés, ez jelenleg a legelterjedtebb energiaintegrációs módszer. A neutron—epitermikus neutron módszert inkább speciális esetekben alkalmazzák, ha pl. nagy termikus befogási hatáskeresztmetszetű elemek jelenlétével kell számolni.

Az energiaintegrációs neutronszelvényezéseknél a neutronforrás rendszerint izotóp, ( $\alpha$ , n) típusú kevert vagy egykomponensű transzurán forrás. A mélyfúrási geofizikában korábban a 138 nap felezési idejű  $^{210}\text{Po}$ —Be volt használatos, jelenleg a  $^{239}\text{Pu}$ —Be, a  $^{241}\text{Am}$ —Be és a legnagyobb neutronhozamú  $^{252}\text{Cf}$  forrásokat használják elsősorban.

A termikus neutronok eloszlását a kőzetben a neutrongáz-fizikából ismert transzportegyenletek, illetve az egyszerűbb diffúziós



egyenletek írják le matematikailag. Rendszerint kétcsoportos (gyors és termikus) vagy háromcsoportos (gyors, epitermikus és termikus) diffúziós elméleti leírást alkalmaznak. A mérések gyakorlati, porozitásra történő hitelesítése a sok változó tényező miatt általában ismert porozitású kőzetmodellekkel történik.

### Neutron-élettartam szelvényezés

A neutron-élettartam szelvényezés alkalmazását a fúrólyuk szelvényezési technológiában az impulzus üzemű neutrongenerátorok megjelenése tette lehetővé. A kis átmérőjű és mélyfúrások esetén magas hőmérsékletű közegben stabilisan dolgozó neutrongenerátorok megvalósítása nehéz technológiai feladat volt, ezért mind az USA-ban, mind a Szovjetunióban csak a 60-as évek elején jelentek meg az üzemszerűen alkalmazható ilyen típusú műszerek. A 14 MeV energiájú, kb. 30  $\mu$ s-os neutronimpulzusokat a generátor 1000 Hz ismétlődési frekvenciával bocsátja ki, és a mérés a neutronimpulzusok szünetében rendszerint két kapunyitási intervallumban történik (pl. 400 és 800  $\mu$ s-nál történő nyitással egyenként 100  $\mu$ s időtartamig).

A neutron-élettartam szelvényezés a mérőrendszert körülvevő közeg makroszkopikus termikusneutron-befogási hatáskeresztmetszetét érzékeli elsősorban. A termikussá kb. 10–50  $\mu$ s alatt lelassuló neutronok élettartama a kőzetek anyagi összetételétől függően 5 és 900  $\mu$ s között változik, a két szélső adat konyhasóra, illetve kvarcitra vonatkozik. A neutronimpulzust követő két,  $T_1$  és  $T_2$  időpontban mért  $N_1$  és  $N_2$  neutronfluxus aránya a következő összefüggésben van a termikusneutron-befogási hatáskeresztmetszettel [2, 3]:

$$\frac{N_2}{N_1} = \Sigma v (T_2 - T_1),$$

ahol  $\Sigma$  a termikusneutron-befogási hatáskeresztmetszet,  $v$  a neutronok sebessége (termikus energián kb. 2200 m/s).

A neutron-élettartam szelvényezésre a H-tartalmon kívül rendszerint a Cl-tartalom jelenti a legnagyobb befolyást. Így a szénhidrogén- és vízkutatásban különösen nagy jelentősége van, erre a későbbiekben mutatok be példát.

## Energiaszelektív neutronszelvényezések

Az energiaszelektív neutronszelvényezéseket azon elemek meghatározására alkalmazzuk, amelyek vagy a gyors neutronok rugalmatlan szóródása következtében karakterisztikus gamma-sugárzással jelentkeznek, vagy a lelassult neutronok radiációs befogásakor emittált karakterisztikus gamma-sugárzásuk révén elkülöníthetők.

A kétféle karakterisztikus gamma-sugárzás elkülönítése gyakorlatilag csak a fúrólyuk-neutrongenerátorok alkalmazása után vált lehetővé. Ilyenkor a neutrongenerátorhoz csatlakozó energiaszelektív mérésre alkalmas detektorok közül az egyik a neutrongenerátor sugárzásával egyidőben működik a rugalmatlan szóródási folyamat detektálására (kb. 30  $\mu$ s-ig), a másik pedig az impulzusok szünetében a radiációs befogás folyamatában létrejövő spektrumokat érzékeli.

A neutrongenerátorok 14 MeV kezdeti neutronenergiája és trícium céltárgynál  $1-5 \cdot 10^{10}$  n/s nagyságú neutronhozama lehetővé teszi, hogy a Cl-n kívül a C, O és Si egyes jellegzetes spektrumvonalait is elkülöníthessük, és így további lehetőségek nyíltak a szénhidrogén- és szénkutatásokban történő alkalmazásoknál.

## Neutronaktivációs szelvényezések

Felhasználásuk a fúrólyuk geofizikában lehetővé teszi néhány elem kvantitatív, illetve ércék kvalitatív jellegű meghatározását. Mivel az aktivációs analízisről már hangzott el előadás, a témacsoporttal csak a földtani kutatás speciális vonatkozásai viszonylatában foglalkozom.

Közetminták esetében az észlelhető bomlások száma  $T$  mérési idő alatt a következő általános összefüggés szerint alakul:

$$I(T) = \frac{L\sigma Gg}{A} (Fm\alpha) (1 - e^{\lambda B}) (e^{-\lambda H}) (1 - e^{\lambda T}),$$

ahol  $L = 0,6023 \cdot 10^{24}$  (Loschmidt-szám),  $\sigma$  az aktivált izotóp hatáskeresztmetszete,  $G$  a természetes izotóparány,  $g$  a gamma-hatásfok,  $A$  az aktivált elem atomsúlya,  $F$  az aktiváló neutronfluxus



a közetben ( $n/\text{cm}^2 \text{ s}$ ),  $m$  a minta tömege (g),  $\alpha$  az elem súlyarányban kifejezett koncentrációja,  $\lambda$  a bomlási állandó,  $B, H, T$  a besugárzási, hűtési és mérési időtartamok.

Fúrólukviszonyok között csak olyan elemeket határozhatunk meg neutronaktivizációs módszerrel, amelyek befogási hatáske- resztmetszete nagy, a létrejött izotóp felezési ideje kicsi, és az aktiválható izotóp aránya az elemen belül megfelelő. Hazai viszonylatban ilyen elemek elsősorban az Al, a Cu és a Mn.

A kutatásban felhasznált kölcsönhatások és az alkalmazott technológia általános ismertetése után röviden foglalkoznék a neutronok felhasználásával egyes konkrét nyersanyag-kutatói ágazatokban néhány példa bemutatásával.

### **A neutronok felhasználása konkrét nyersanyagkutatói feladatok megoldásában**

#### **A neutronok felhasználása a szénhidrogén-kutatásban**

A neutronok felhasználása a természeti erőforrások kutatásában a szénhidrogénmezők feltárásában kezdődött, a legegyszerűbb energiaiintegrációs módszer, a neutron—gamma szelvényezés alkalmazásával. Mindmáig a szénhidrogén-kutatás igénye a hajtóereje a neutron-technológiák fejlesztésének, mivel a nagy mélységű, mag-mintavétel nélküli, költséges fúrások megkövetelik a legkorszerűbb mélyfúrási geofizikai mérések alkalmazását, s egyben elviselik a költséges új technológiák kifejlesztését (pl. fúróluk neutrongenerátor).

A szénhidrogén-kutatásban a különböző neutronmódszereket alapvetően két feladat megoldására alkalmazzák: a porozitás meghatározására és a pórustartalom közelítő megadására.

#### **A porozitás meghatározása**

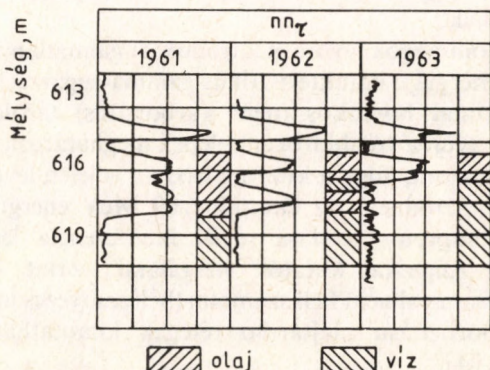
A porozitás meghatározására a neutronintegrációs szelvények közül jelenleg általában a neutron—termikus neutron szelvényezést alkalmazzák. A porozításra történő hitelesítés — a két-, illetve

háromcsoportos diffúziós elméleti számítások figyelembevételével (MÁELGI-ELTE) — modelltelepen történik. A homokos tárolók effektív porozitásának meghatározásánál elérendő pontosság a porozitás értékének  $\pm 10\%$ -a.

#### A pórustartalom közelítő megadása

A pórustartalom (olaj, gáz, víz) meghatározása bonyolultabb feladat. Megoldására világviszonylatban a neutron-élettartam szelvényezést, valamint a klór, karbon, esetleg oxigén kiegészítő szelvényezést alkalmazzák. A neutron-élettartam szelvényezésből, ha a porozitás más módszerből ismert, a vízszaturáció számításával a gáztároló rétegek és az olajtároló rétegek is meghatározhatók, ha a rétegvíz sótartalma elég nagy (meghaladja a kb. 20 g/l koncentrációt). Az 1. ábrán az irodalomból vett példát mutatok be, béléscsővezetett fúrásban az olajtest leművelésének ellenőrzésére felvett szelvények formájában [1].

Másik megoldást jelent, ha a víztelítettséget elektromos szelvényezésből is meghatározzák, és ezekkel az adatokkal vetik össze a neutron-élettartalomról vett, olaj vagy gáz feltételezésével számított  $S_w$  értékeket. Az USA-ban, Dél Louisiana államban végzett interpretációs példát mutatok be a 2. táblázatban. Itt a termelési próba teljes mértékben igazolta a mérések interpretációját [4].



1. ábra. Olajtest leművelésének ellenőrzése szelvényekkel



2. táblázat. Vízeltéttség meghatározása neutron-élettartam szelvényezésből

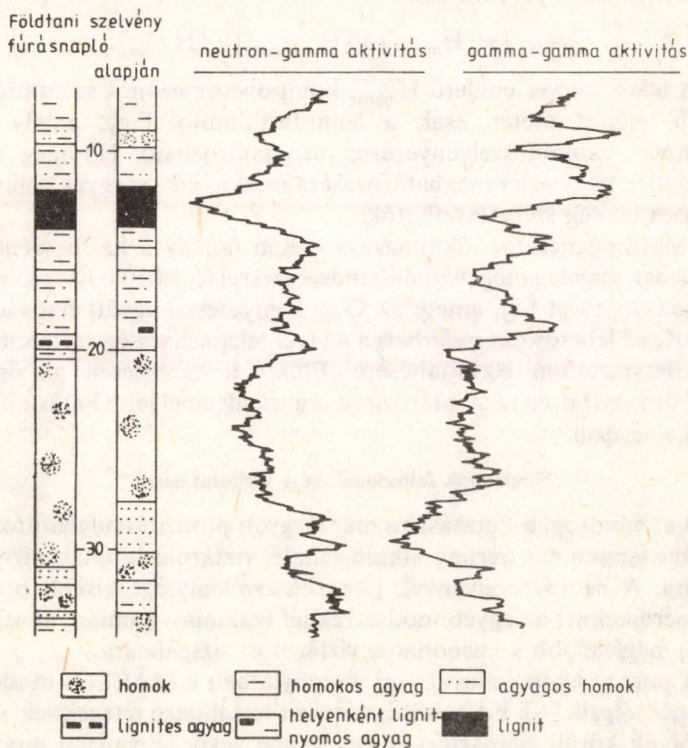
A zóna sor-száma	A zóna mély-sége, m	Vízeltéttség, %			Interpretációs döntés	Termelési próba eredménye
		Elektromos szelvényekből	$\Sigma$ -ból, olaj feltételezésével	$\Sigma$ -ból, gáz feltételezésével		
1	3570-71	28	15	28	gáz	száraz gáz, könnyű kondenzátumnyomokkal
2	3588-89	14	15	27	olaj	88 barrel olaj/nap, nagy GOV-val
3	3605-06	21	12	24	gáz	1 millió köbláb gáz/nap, 50° API sűrűségű kondenzátummal
4	3638-39	11	15	27	olaj	147 barrel olaj/nap, normális GOV-val

Energiaszelektív méréssel, 5 MeV körüli, illetve feletti gamma-energiák regisztrálásával a klór nagy befogási hatáskeresztmetszetét felhasználó ún. Cl szelvényezés is lehetővé teszi a szénhidrogéntelepek elkülönítését kellő sókoncentráció esetén. A szelvény porozitás függőségét neutron—termikus neutron szelvény egyidejű felvételével korrigálják.

A szénatommagok gyors neutronok rugalmatlan ütközésekor 4,43 MeV energiájú karakterisztikus gamma-sugárzást bocsátanak ki, ez a vonal homokos (nem karbonátos) tárolók esetében lehetőséget nyújt a szénhidrogén-telepek meghatározására. Problémát jelent viszont, hogy a közetmátrixban is jelen levő oxigénatomok is gerjesztődnek. Az emittált 6,09 MeV energiájú gamma-fotonok Compton-szóródása révén interferencia lép fel a detektálásnál. Amerikai kutatók vizsgálatai szerint, ha nagyobb infiltrációs zónával nem kell számolni (béléscsövezés után) 15%-nál nagyobb porozitású olajtároló rétegek kimutathatók ezzel a módszerrel [4].

## Neutronok felhasználása a szénkutatásban

Mivel a széntelepek hidrogéntartalma lényegesen nagyobb, mint a meddő kőzeteké, az agyagokat is beleértve, neutronintegrációs szelvényezésekkel a telepek kimutathatók. A neutronszelvényezések a meddő rétegsor tagolásában is jól használhatók (nagy H-tartalmú agyagok, kis porozitású homokkövek, karbonátok, eruptív kőzetek elkülönítése). Bár a nagyobb porozitású barnaszéntelepek elkülönítése jobb hatásfokú a térfogatsúly-különbségen alapuló gamma—gamma szelvényezés alapján, különösen többszöri csövezés esetén a nagyobb áthatolóképesseggű neutron-



2. ábra. Lignittelep kijelölése neutron—gamma szelvényezéssel



szelvényezés is fontos lehet. A 2. ábrán bemutatok egy példát korábbi visontai méréseinkből, ahol a lignittelep a neutron—gamma szelvényen négyszeres csövezés ellenére is megbízhatóan elkülöníthető [5].

Hazai gyakorlatban a korszerű neutronszelvényezések lehetőségei nincsenek kellően kihasználva a telepek minőségének vizsgálatánál. Szilikát (agyagos) tartalmú hamuanyag esetén van lehetőség pl. a neutronaktivációs módszer alkalmazására.

Különösen fontos lehet a mecseki feketeszénfúrások vizsgálatánál az összhidrogén-tartalom meghatározása. Itt ugyanis mindhárom fázis jelenlétével számolva a telep össz-hidrogéntartalma 3 komponensből tevődik össze:

$$[H_{\text{össz}}] = [H_{\text{mátrix}}] + [H_{\text{nedvesség}}] + [H_{\text{metán}}].$$

A telep szerves eredetű  $H_{\text{mátrix}}$  komponense azonos szénültőségű fokú telepek esetén csak a hamutartalomtól függ, amely pl. gamma—gamma szelvényezéssel meghatározható. Ha még egy független paraméter meghatározására mód nyílik, az egyes komponensek elvileg szétválaszthatók.

Neutrongenerátor alkalmazása esetén (amely a hazai szénkutatásban jelenleg még nem áll rendelkezésre) fel lehetne használni a C-szelvényezést [1], amely az O-szelvényezéssel együtt hányados képzéssel lehetőséget nyújthatna a  $H_2O$  telepnedvesség-tartalom és a  $CH_4$ -tartalom elkülönítésére. Ehhez természetesen az összhidrogéntartalom meghatározását is a jelenleginél jobb hatásfokkal kell elvégezni.

### Neutronok felhasználása a vízkutatásban

A szénhidrogén-kutatásban már tárgyalt porozitásmeghatározás természetesen egyszerűen alkalmazható víztároló kőzetek vizsgálatára. A neutronszelvények porozitásérzékenysége kisebb porozitásértékeknél az egyéb módszereknél (gamma—gamma, akusztikus) megfelelőbb a karbonátos víztárolók vizsgálatára.

A porozitáshitelesítést hazai viszonylatban a MÁELGI modelltelepén végzik [6]. Édesvizet és sósvizet tartalmazó rétegeknek — a fúrólyuk körüli elárasztást is figyelembe vevő — elméleti modellezését is elvégezték a csoportdiffúziós elmélet felhasználásával [7].

Meg kell jegyezni, hogy az aránylag egyszerű kutatási feladatot jelentő hazai homokos víztárolók kutatásában a neutronszelvényezések még nem terjedtek el annyira, mint a hazai szénhidrogén- vagy szénkutatásban.

**Kőzetek in situ nedvességtartalmának  
meghatározása neutronporozitásból és ennek  
kőzetmechanikai vonatkozásai**

A neutronintegrációs szelvényezések adatai a kőzet össz-hidrogéntartalmával arányosak. Ez tiszta homokos tárolók esetében a pórusokban levő víztartalmat jelenti, de ha a kőzet agyagos komponenst is tartalmaz, a mért ún. neutronporozitás az agyag-ásvány hidrátburkát képező, mozgásképtelen vízszaturációból és az agyagásvány kristályvizéből származó hidrogénatom-koncentráció hatását is tartalmazza. Az agyagos homokkőtárolókra vonatkozóan a szénhidrogén-kutatásban ezt a problémát úgy oldják meg, hogy ugyanabban a fúrásban másik porozitás meghatározó módszert (pl. gamma—gamma) is alkalmaznak, és a két szelvény korszerűen számítógéppel végzett összehasonlító interpretációja alapján meghatározzák a réteg agyagtartalmát.

Az inpermeábilis agyag- és márgarétegek neutronporozitásával a szénhidrogén-kutatásban általában nem foglalkoznak. A szénbányászat szempontjából viszont ez a probléma ott válik érdekessé, hogy éppen a lágy, nagy víztartalmú agyagos kőzetek aknamélyítésnél, bányaművelésnél komoly nehézségeket okozhatnak. A fúrómag mintákon végzett kőzetmechanikai vizsgálatok adatai gyakran jelentősen eltérnek az in situ állapottól, különösen, ha az agyagos kőzetmintát részleges kiszáradás érte.

Az eocén programmal kapcsolatos aknatengelyfúrások vizsgálata során kidolgoztam egy módszert, amely a legfontosabb agyag-ásványok kémiai összetételének figyelembevételével lehetővé teszi, hogy a mért neutronporozitás-értékeket korrigálni lehessen a laboratóriumi 105 °C-on történő szárításnál el nem távozó kristályvíz hatásával. Így a neutronporozitásból a kőzetmátrix sűrűségének ismeretében számítani lehet az agyagos kőzet in situ víztartalmát [8]. Ennek az a jelentősége, hogy a kőzetek víztartalma annak



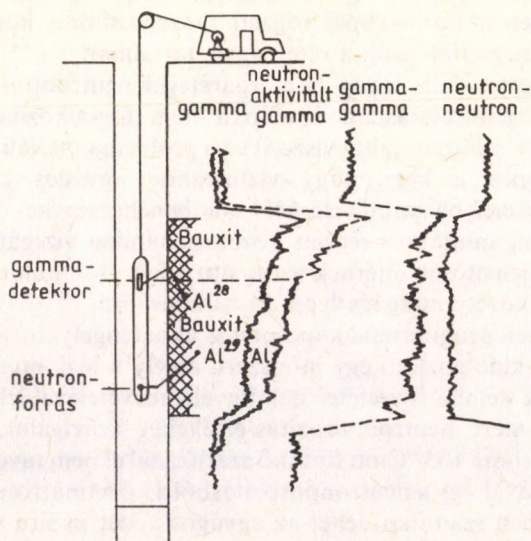
összes közetmechanikai jellemzőjét befolyásolja, így a neutronporozitásból az agyagos rétegek in situ víztartalmának  $\pm 2$  százalékpontos pontossággal történő megadása elősegíti a biztonságosabb és gazdaságosabb bányászati biztosítás méretezését.

### Neutronaktivációs szelvényezések a fúrási kutatásban

Utoljára, de nem utolsósorban röviden néhány szót a neutronaktivációs szelvényezés alkalmazásáról azon elemek esetében, amelyek a hazai bányászat és nyersanyagkutatás szempontjából népgazdaságilag kiemelkedően fontosak. Ezek elsősorban az Al, a Mn és a Cu.

#### Bauxitbányászat és a hozzá kapcsolódó kutatás

Az  $^{27}\text{Al}$ -ből termikus neutronok befogása útján képződő  $^{28}\text{Al}$  izotóp lehetővé teszi a bauxitlep egyértelmű kimutatását folyamatos aktivációs szelvénnel. Az alkalmazott metodikát és a kapott szelvényeket a 3. ábrán mutatom be [9].



3. ábra. Bauxitlep kimutatása neutronaktivációs szelvényezéssel

3. táblázat. Neutronaktivációs szelvényezést befolyásoló paraméterek

Sor- szám	Elem	Izotóp (előfor- dulás, %)	Reak- ció	$E_{nk}$ , MeV	Hatás- keresztmetszet, $10^{-30} \text{ m}^2$			Aktív nuk- lid	$\tau_{1/2}$	$E_\gamma$ , MeV (gyako- riság, %)	$A_\infty$ , Bq/g	$A_{mi}$ , Bq/g	$A_{mf}$ , Bq/g
					$\sigma_t$	$\sigma_r$	$\sigma_{14}$						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
1	Al	$^{27}_{13}\text{Al}$ (100)	(n, $\gamma$ )	—8,00	21,5		0,053	$^{28}_{13}\text{Al}$	2,31 min	1,78 (100)	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
2			(n, p)	1,88		0,43	7,9	$^{27}_{12}\text{Mg}$	9,45 min	0,84 (70) 1,01 (30)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
3			(n, $\alpha$ )	3,24		0,065	12	$^{24}_{11}\text{Na}$	14,95 h	1,37 (100) 2,75 (100)			
4	Si	$^{28}_{14}\text{Si}$ (92,18)	(n, p)	4,00		0,2	22	$^{28}_{13}\text{Al}$	2,31 min	1,78 (100)	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
5			(n, 2n)	17,78		$10^{-5}$		$^{27}_{14}\text{Si}$	4,22 s	0,84 (0,2) 1,01 (0,2)			
6		$^{29}_{14}\text{Si}$ (4,71)	(n, p)	3,14		0,06	10	$^{29}_{13}\text{Al}$	6,56 min	1,28 (85) 2,43 (15)	$1 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$
7		$^{30}_{14}\text{Si}$ (3,11)	(n, $\gamma$ )	—6,81	11		0,049	$^{31}_{14}\text{Si}$	2,65 h	1,26 (0,07)			
8			(n, $\alpha$ )	4,33		0,01	8	$^{27}_{12}\text{Mg}$	9,45 min	0,84 (70) 1,01 (30)	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$



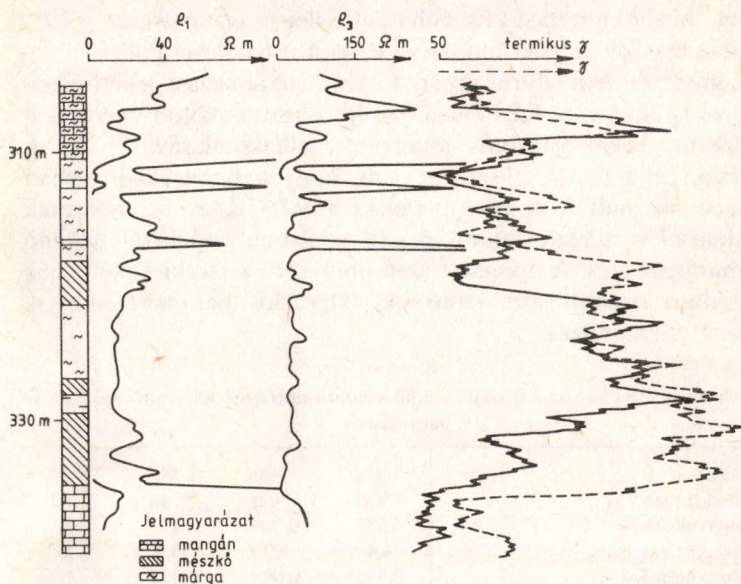
Az Al-tartalom számszerű meghatározásához több tényezőt kell korrekcióba venni, a meghatározási pontosság a jelenlegi technológiával az Al-tartalom  $\pm 10\%$ -ára tehető. A vizsgált térfogat a regisztrált gamma-sugárzás kisebb áthatolóképesége miatt 15–20 cm sugarú térnek felel meg, de — mint a geofizikai módszereknél általában — ez is a magminta térfogatához viszonyítva megfelelőbb átlagolási lehetőséget jelent.

A bauxitkutatásban a mélyfúrási geofizika legnagyobb megoldatlan problémája még mindig az Al/Si modulusz kellő pontosságú meghatározása. A 3. táblázatban összefoglalóan láthatók az Al-ra és Si-re fellépő reakciók és a neutronaktiváció szelvényezést befolyásoló paraméterek [10]. A táblázatban vastagon nyomtatott számok jelzik a gyakorlatilag felhasználható reakciók paramétereit. Ennek megfelelően a neutrongenerátoros technika alkalmazásával neutronaktivációs úton a 2. sorszámú reakció felhasználásával határozzák meg az Al-tartalmat a  $^{27}\text{Mg}$  0,84 MeV energiájú sugárzásának detektálásával. Egyidejűleg az 1,78 MeV-nál jelentkező fotócsúcs intenzitásával mérik az 1. és 4. számú reakció együttes aktivitását, amely a gyors- és termikusneutron-fluxus ismeretében szétválasztható.

Megjegyzem, hogy pl. a kanadai Scintrex cég METALOG szelvényezési rendszere a termikus neutronok Al és Si által történő radiációs befogását használja fel az Al-nál 7,724 MeV, a Si-nál 4,934 MeV gamma-energiák energiaszelektív regisztrálásával, számítógépes kiértékeléssel.

#### **Mangánérctelepek meghatározása neutronaktivációs módszerrel**

A mangánérctelep geofizikai szelvényezés útján fúrásban történő elkülönítését a  $^{55}\text{Mn}$  termikus neutronokkal szembeni anomálishan nagy befogási hatáskeresztmetszete teszi lehetővé. A 4. ábrán bemutatom egy Űrkút környékén korábban (1966 körül) végzett fúrólyuk szelvényezés részletét [5]. A mangánérctelep szakaszt PuBe forrással aktiváltuk úgy, hogy 1 m/min vontatási sebesség mellett a forrás négyszer haladt el az érces összlet mellett, így egy rétegre vonatkozóan az aktiválási idő kb. 4 perc volt. A rövid felezési idejű izotópok (pl. Al) hatásának figyelmen kívül hagyása érdekében



4. ábra. Mangánkutató fúrás szelvényrészlete Úrkút környékéről

az aktivációs gamma-sugárzás regisztrálását két óra múlva végeztük el. Az ábrán folyamatosan kihúzva látható a neutronaktiváció előtt felvett természetes gamma-szelvény és megegyező alapvonalal szaggatottan a neutronaktiválás után 2 órával felvett gamma-szelvény. A két szelvény elválása a Mn-telep helyét határozottan kijelöli. Az aktiválási idő növelésével a Mn-tartalom számszerű meghatározása is lehetséges, laboratóriumi körülmények között a  $\pm 1\%$  meghatározási pontosság biztosítható.

#### Rézérctelepek meghatározása neutronaktivációs módszerrel

Kőzetminták réz- és cinktartalmának neutronaktivációs úton történő meghatározására laboratóriumi méréseket hazai viszonylatban a MÁELGI-ben már 1972-ben eredményesen végeztek. Megállapították, hogy laboratóriumi viszonyok között  $0,1\%$  réztar-



talom, mint kimutatási küszöbhatár mellett a réztartalmat  $\pm 10\%$  pontossággal meg lehet határozni ezzel a módszerrel [11].

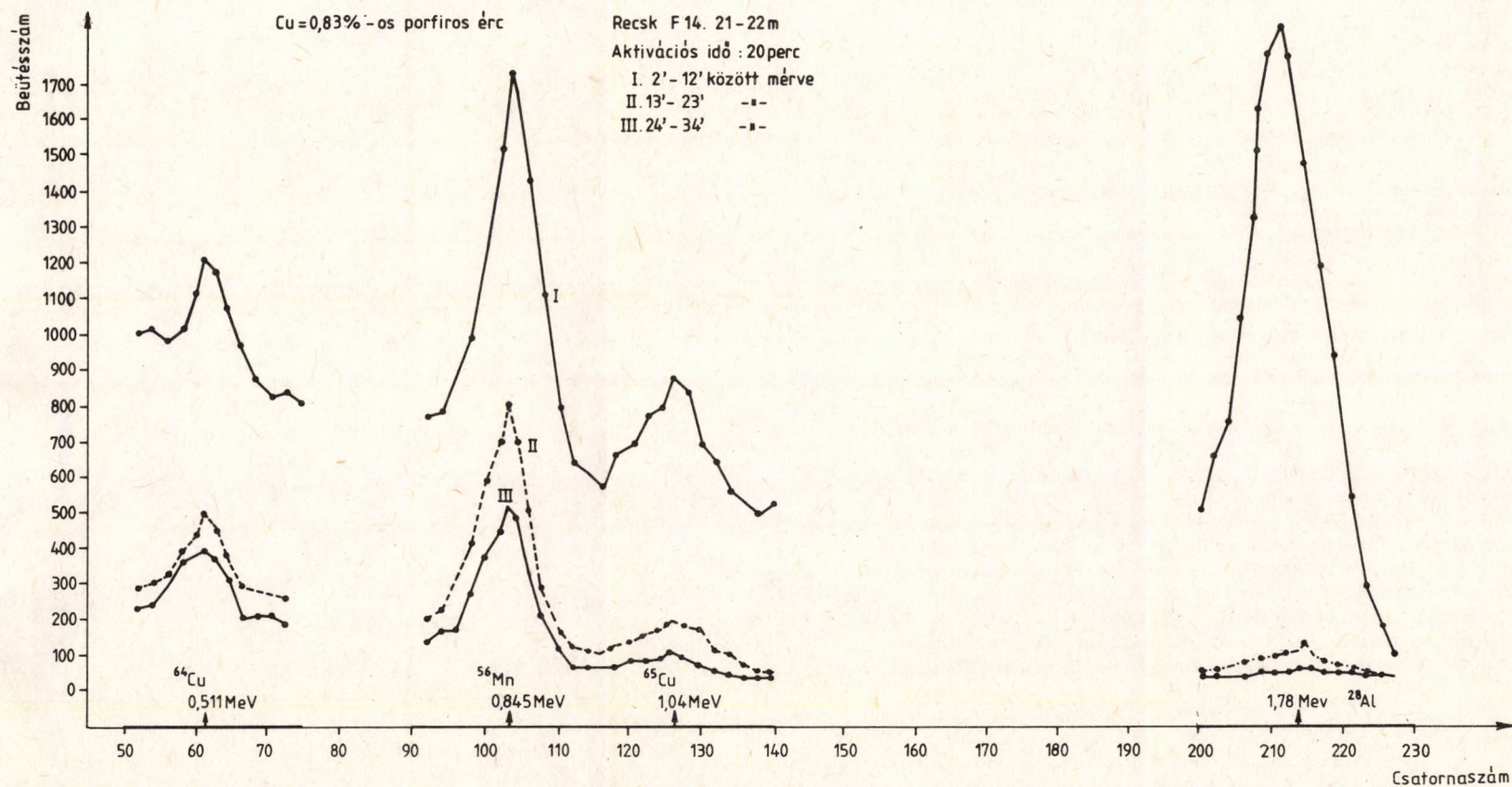
A módszer bányafúrásokban történő alkalmazási lehetőségeinek vizsgálatára a KBFI-ben recski kőzetmintákon méréseket végeztünk 1024 csatornás analizátor felhasználásával [12]. A mérések célja annak eldöntése volt, hogy a bányakarottázsban jelenleg használt nem energiaszelektív MINIKAR berendezések alkalmasak-e a réztartalom in situ neutronaktivációval történő meghatározására. A vizsgálat szempontjából a recski kőzetekben előforduló legfontosabb izotópok aktivációs paramétereit a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat. A recski kőzetekben előforduló legfontosabb izotópok neutronaktivációs paramétere

Anyaelem	$^{63}\text{Cu}$	$^{65}\text{Cu}$	$^{55}\text{Mn}$	$^{27}\text{Al}$
Radioaktív izotóp	$^{64}\text{Cu}$	$^{66}\text{Cu}$	$^{56}\text{Mn}$	$^{28}\text{Al}$
Izotópgyakoriság	0,691	0,309	1	1
Hatáskeresztmetszet, b	4,4	2,2	13,3	0,232
Gamma-hatásfok	0,375	0,092	1,473	1
Felezési idő	12,8 h	5,1 min	2,58 h	2,3 min
Domináns gamma-energia, MeV	0,511	1,039	0,847	1,78

A porított ércminták aktiválását  $^{252}\text{Cf}$ -izotóppal végeztük. Az aktiválási idő 20 perc volt, 2 perc hűtés után 5, illetve 10 perces mérési sorozatokat végeztünk összesen 30 perc időtartamú mérési periódussal. A minták réztartalma, amelyet kémiai elemzéssel határoztak meg, 6,86%—0,58% szélsőértékek között volt. A kapott eredmények közül bemutatom az egyik, 0,83% Cu-tartalmú porfiros ércmintára vonatkozót, csak a vizsgált izotópok domináns csúcsait tartalmazó, két csatornaként átlagolt szakaszokban (5. ábra). Mint az ábrából látható, a zavaró elemnek tekinthető  $^{56}\text{Mn}$ - és  $^{28}\text{Al}$ -izotópok magasabb beütésszámmal jelentkeznek, mint a közel hasonló felezési idejű rézizotópok. Így kimondhatjuk, hogy recski fúrások neutronaktivációs szelvényezésénél csak energiaszelektív méréseket lehet alkalmazni. A meghatározásra a vizsgálatok alapján a  $^{64}\text{Cu}$  0,511 MeV-os sugárzásának energiaszelektív detektálása látszik alkalmasnak.





5. ábra. Réztartalom-meghatározás neutronaktivációval





Mivel a jelenlegi bányakarottázs berendezés nem energiaszelektív, a neutronaktivációs szelvényezés recski bevezetésével még várni kell. Jelenleg a MÁELGI röntgenfluoreszcencia-analízis alapján végez eredményes méréseket recski bányafúrásokban, de ezek kis behatolásuk miatt csak a fúrólyuk falának analízisét adják. A neutronaktivációs mérések in situ alkalmazását véleményem szerint továbbra is időszerűvé teszi a nagyobb közettartomány érc tartalmára történő átlagolási lehetőségének biztosítása.

A hazai viszonylatban fontos 3 tárgyalt elemen kívül a neutronaktivációs szelvényezés más megfelelő aktivációs paraméterekkel rendelkező elemek meghatározására is alkalmazható. Így irodalomból ismeretes, hogy B- és Be-telepek kimutatására is sikeresen végeztek fúrólyukakban méréseket.

Az előadásban rövid áttekintést szerettem volna nyújtani a neutronok felhasználásáról a természeti erőforrások, nyersanyagok kutatásában. Ez a felhasználás már jelenleg is sokrétű, de az alkalmazható technológia fejlődésével pl. a neutrongenerátorok szélesebb körű alkalmazásával, még fokozottabb jelentőségű lesz.

## Irodalom

1. Neutronfizika. Szerk.: KISS. D.—QUITTNER P.: Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
2. Mélyfúrási geofizika. Szerk.: MARKÓ L.—SEBESTYÉN K.—STEGENA F.: Egyetemi Tankönyv, Tankönyvkiadó, Budapest, 1970.
3. BARLAI Z.: Fúrólyukban végzett geofizikai vizsgálatok speciális problémái. NIMDOK, Budapest, 1971.
4. II. Szelvényezési Szimposium közleményei (SPWLA, 1970. Los Angeles). Magyar fordítás. NIMDOK, Budapest, 1973.
5. FÁBIÁNCICS L.: Szilárdásványkutatás mélyfúrási geofizikája. NME egyetemi jegyzet, Miskolc, 1968.
6. ANDRÁSSY L.—BARÁTH I.—DRAHOS D.: Magyar Geofizika, XII (1971) 63.
7. ELGI 1978. évi évkönyv. Budapest, 1979.
8. FÁBIÁNCICS L.: Aknamélyítés tervezéséhez szükséges adatok meghatározásának lehetősége geofizikai szelvényezésből. Doktori disszertáció. NME, Miskolc, 1977.
9. BALOGH I.: Magyar Geofizika, XXI (1980) 170.
10. SALAMON B.: Magyar Geofizika, XIX (1978) 23.
11. RENNER J.: Magyar Geofizika, XIV (1973) 186.
12. Neutronaktivációs mérések Cu meghatározására. KBFI kutatási jelentés, Budapest, 1979.



# Neutronok és a mezőgazdaság

Nagy Árpád

GATE Fizikai Tanszék, Gödöllő

## Bevezetés

James Chadwick felfedezése korszakalkotó hatást gyakorolt az anyagról alkotott ismereteinkre. Nyomában felvirágzik a magfizika tudománya, amely termékenyítőleg hat szinte minden tudományos terület, így a mezőgazdasági tudományok fejlődésére is.

A mezőgazdaságban az 1930-as években nagy szükség volt minden új tudományos információra. Hiszen ekkor már a gyakorlatban érezhetővé vált, hogy a Föld mezőgazdasági területei végesek, s a gyorsulóan növekvő minőségi és mennyiségi igényeket a jövőben nem lehet kizárólag a termőterület növelésével kielégíteni. Számos jel mutatta: az *extenzív* mezőgazdaság korszaka lejárt. Hamarosan át kell térni egy szilárd ismereteken alapuló, új technológiát alkalmazó mezőgazdaságra, ahol minden tudományos eredményt mobilizálnak a megművelhető termő talajok *intenzív* kihasználására.

Ebben az új mezőgazdaságban az elvi és gyakorlati eredmények gyarapításában a neutronokra is jutott szerep. Erről igyekszünk röviden számot adni e fejezetben, hangsúlyozva a hazai kutatási eredményeket és azok jelentőségét. Nem a történeti sorrendet követjük, hanem a mezőgazdaság egészéről törekszünk keresztmetszetet adni a talaj—víz, a talaj—tápanyag, a talaj—növény kapcsolatokon keresztül és eljutunk a megtermelt növényi produktum felhasználásáig, miközben bemutatjuk a racionális víz- és tápanyaggazdálkodásnak, a növénynemesítésnek és az ésszerű takarmányozásnak a neutron felfedezése nyomán kialakult egyes új eszközeit és eredményeit.

## Talaj—víz kapcsolat kutatása neutronokkal

A növény élete a talajban víz nélkül nem képzelhető el. Szinte nincs a talajnak olyan fizikai, kémiai, biológiai tulajdonsága, amit a víz jelenléte vagy hiánya ne befolyásolna. 1 g növényi szárazanyag előállításához mintegy 1000 g vízre van szükség. Ezt az óriási mennyiséget a növény a talajon keresztül kapja meg, amely a kiegyenlítés, tartalékolás, tárolás feladatát is ellátja. A tápanyag-felvétel a zizen keresztül történik. Így érthető, hogy *a talajnedvesség-meghatározás a talajfizika egyik alapvető igénye*. A kapott eredmény egyaránt hasznos a talajtípusok tudományos osztályozásának kialakításánál, a talaj hasznosítható vízkapacitásának megállapításánál, mindpedig a hatékonyabb művelési mód, a víz-, a tápanyag- és a növényvédőszer-felhasználás gyakorlatában. A talaj—víz kapcsolat ismerete hozzásegít a természetes csapadékok jobb hasznosításához, az öntözéses gazdálkodás elterjedéséhez, és egyidejűleg csökkenti a helytelen vízhasználatból eredő talajkárosító hatásokat (erózió, kiszáradás stb.).

A különböző vízgazdálkodási eljárások összehasonlításának alapja rendszerint a nagyszámú talajnedvesség-meghatározás. A mérések feladata a talajnedvességprofil megismerése mintegy 5 méter mélységben, több évre kiterjedően. Ez természetesen nagyon költséges, munkaigényes, laboratóriumhoz kötött feladat volt a hordozható neutron-visszaszóráson alapuló nedvességmérők kifejlesztése előtt.

A klasszikus, talajmintavételen és a minta laboratóriumi termogravimetriás mérésén alapuló talajnedvesség-mérési eljárásra látunk példát az 1. ábrán. Az ábrán erdei talaj vízkoncentráció-változása van feltüntetve súly%-ban a talajmélység és az idő függvényében. A talaj növényzete kivágásra érett tölgyerdő. A talaj a növényzettel komplex ökológiai egységet alkot. Az adott körülmények között (vagyis az adott klimatikus tényezők, az adott talajkarakterisztika és művelési mód, valamint adott növényzet mellett) megfigyelhetjük a talajnedvesség tárolás-kiürítés szezonális periódusait. Az erdő kontroll területe 1928—34 között zavartalan (1a. ábra). Ugyanazon erdő más része 1932—33 telén kivágásra kerül (1b. ábra). A transpirációs szivattyúzás az erdő kivágása után



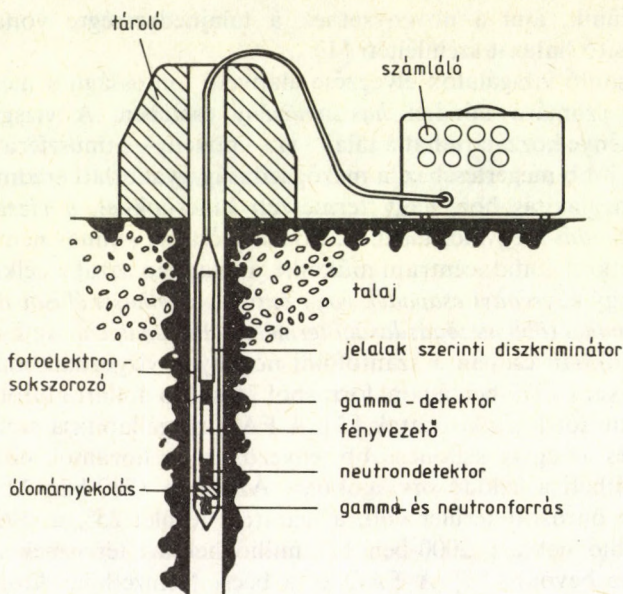
1. ábra. Erdei talaj nedvességtartalmának változása (súly%) a talajmélység és az idő függvényében: a) az erdő kontroll területe 1928—34 között zavartalan; b) ugyanazon erdő más része 1932/33 telén kivágásra került [1]

megszűnik, ami a növényzetnek a talajnedvességre vonatkozó módosító hatását szemlélteti [1].

Hasonló vizsgálatok elvégzése alapvető fontosságú a mezőgazdaság számára minden *haszonnövény* esetében. A vizsgálatok eredménye hozzájárulhat a talaj—víz—növény—atmoszféra kontinuum jobb megértéséhez, a mezőgazdaság gyakorlati eredményeinek megjavításához, nagy természeti kincsünkkel, a *vízzel való gazdálkodás* megvalósításához. Éppen ezért ma számos nemzeti és nemzetközi kutatócentrum működik a világban azzal a célkitűzéssel, hogy *egységnyi csapadék vagy öntözővíz felhasználásával végső soron minél több mezőgazdasági terméket állítsanak elő*. Az Egyesült Államokban csupán a szántóföldi növények vízgazdálkodásának kutatására 1979-ben állami forrásból 74 millió dollárt költöttek, és 692 kutatót foglalkoztattak [2]. A FAO megállapítása szerint az öntözés az egyik legfontosabb tényező, ami a hozamok növelését elősegítheti a fejlődő országokban. Ázsiában 1980-ban 72 millió hektár öntözött terület volt, a learatott terület 25%-a. 1990-ben 96 millió hektárt, 2000-ben 117 millió hektárt terveznek az öntözésbe bevonni [3]. A FAO és a bécsi Nemzetközi Atomenergia Ügynökség 1964-ben létrehozott egyesített szervezete (Joint FAO/IAEA Division) 26 fejlődő országnak nyújt a vízgazdálkodási kutatásban mérés technikai segítséget [4]. Sokuk programjában szerepel a hordozható, neutronos nedvességmérők hasznosítása és fejlesztése, együtt a hasonló elven működő talajsűrűség-mérőkkel.

A 2. ábrán a talajnedvesség- és sűrűségmérésre egyidejűleg alkalmas szondát láthatunk, in situ mérések végzésére. A talajba hatoló szonda végébe neutronforrást helyezünk, amely gyors neutronokat emittál. A neutronok a közegben haladva — főleg hidrogénmagokon történő ütközés révén — elvesztik energiájukat, termalizálódnak. Ha a forrás közelébe termikus neutronokra érzékeny detektort helyezünk el, a termalizálódott neutronok diffúzió útján eljutnak a detektorba. Nagy víz- (hidrogén-) tartalmú közegben a termalizálódás rövid úton végbemegy, tehát nagyobb intenzitást detektálunk. Kis víztartalom esetén a neutronok a forrástól messzebbre eltávolodva veszítik el energiájukat, ezért ilyenkor a detektált neutronok száma csökken.





2. ábra. Talajnedvesség és -sűrűség mérésére egyidejűleg alkalmas szonda [5]

Különösen kis vízkoncentráció esetén egyéb (pl. a nagy tömegben jelenlévő  $\text{SiO}_2$ -,  $\text{FeO}_3$ -,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -vegyületeket alkotó) magok is szerephez jutnak a neutronok lassításában. Így, ha ezen anyagok sűrűsége (száraz sűrűség) változik, megtörténhet, hogy sűrűségváltozást nedvességváltozásként érzékelünk. Ennek kiküszöbölésére szolgál a szondába elhelyezett gamma-forrás és gamma-detektor pár [5].

Tanulságos megjegyezni, hogy radioizotópos gabonanedvességmérők a farmon történt betakarítás és terményszárítás körében nem terjedtek el olyan mértékben, mint ahogy az várható volt. A feladat itt a következő: meg kell állapítani a növény fiziológiai érettségéhez tartozó nedvességtartalmat. Ez pl. egyes kukoricafajta esetén 32 súly% a szemre vonatkoztatva. A betakarítást úgy kell vezetni, hogy ez idő alatt a nedvességtartalom 25% alá ne kerüljön, mivel ez nagy betakarítási veszteséggel jár. A gyakorlat szerint érdekesebb

nedvesen betakarítani, és — ahol erre szükség van — a szemes terményt 14 súly% tárolási nedvességtartalomra szárítani. A mintegy 100 g mintatömeg nedvességtartalmát a szántóföldön és a szárítóberendezésnél olcsó, nagyfrekvenciás elektromos vezetés mérésének elvén működő műszerekkel mérik [6]. A túlszáritás nemcsak tüzelőanyagban költséges, de károsodik a szem beltartalmi értéke is, vagy külsejükön repedt szemek keletkeznek. Ide kapcsolódó feladat a vetőmagvak csírázókéességének (vigor) meghatározása pl. oly módon, hogy a magot deionizált vízbe helyezzük, és mérjük a víz elektromos vezetésének megváltozását [7].

A radioizotópos talajnedvesség- és talajsűrűség-mérés előnye és sajátossága mindenek előtt abban van, hogy nagy (~100 kg) mintatömegre vonatkozó mélységi talajnedvesség profilt szolgáltatnak. Az így kapott méréseredmények referenciapontjai lehetnek a különböző magasságokban készített légifelvételeknek, ahol a növény levélzetéről visszaverődő látható (650—700 nm) és infravörös (775—825 nm) fényből következtetni lehet a várható termés hozamra, ami többek között a vízzel való ellátottság függvénye [8].

### Talaj—tápanyag kapcsolat

Liebig felfedezése a növények ásványos táplálkozásáról új tudományágat és új iparágat teremtett. A szervesetlen műtrágya a szüntelen gyarapodó emberiség táplálásának tartóoszlopa lett; a gyártási-termelési kapacitás a II. világháborút követő 8 millió

1. táblázat. A világ műtrágyatermelő kapacitása, 1979—84 (millió tonnában)

	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Nitrogén* (N)	57,3	60,7	63,4	66,1	68,7	71,1
Foszfát (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	31,4	33,6	35,4	37,4	39,0	40,2
Kálium (K <sub>2</sub> O)	23,4	25,7	27,6	28,7	31,9	33,5
Összesen	112,1	120,0	126,4	132,2	139,6	144,8

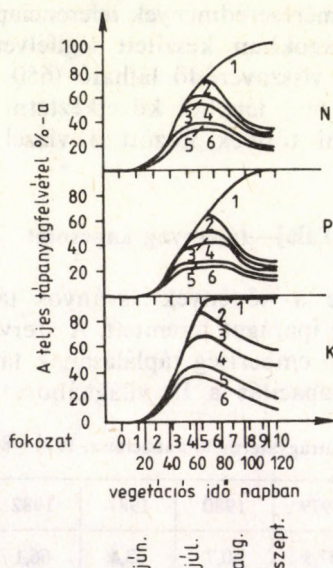
Megjegyzés: Az adatok a FAO 1981. márciusi becslései, levonva a nem műtrágya jellegű felhasználást és a veszteségeket [9].

\* 2,6 millió tonna nitrogén keletkezik évente a légkörben villámlás hatására.



tonnáról 1980-ban 120 millió tonnára nőtt (lásd 1. táblázat). Ázsia mai felhasználása 8 millió tonna, és 2000-re várható felhasználást 48 millió tonnára prognosztizálja a FAO. Biztosra vehető, hogy a jövőben is lesznek alapvető tudományos felfedezések, és hogy ezek okoznak majd meglepetéseket számunkra. Ma a hatékonyságon van a hangsúly. Az agronómusnak a leggazdaságosabb mennyiséget, formát, helyet és időt kell ajánlania a tápanyagutánpótlás megszervezésénél — klímát, talajt és növényt figyelembe venni számításainál. A döntéshez szükséges információt csak hatékony kutatással lehet megszerezni.

Hevesy György — magyar származású kémikus — már 1923-ban végzett kísérleteket arra vonatkozóan, hogyan épülnek be egyes



3. ábra. N, P, K tápelemfelvétel (%) kukoricánövényben a vegetációs idő függvényében (nap) és eloszlása a megnevezett növényrészekben: 1. szemtermés, 2. csutka, 3. csuhé, 4. szár, 5. levéllemez, 6. levelek. Az érett növény szemtermésében van a teljes abszorbeált nitrogén és foszfor kétharmada, a kálium egyharmada. A levél foszfortartalma 50-től 80 nap között meglehetősen állandó, így levélanalízis végzésére ez az időpont a legalkalmasabb [11]

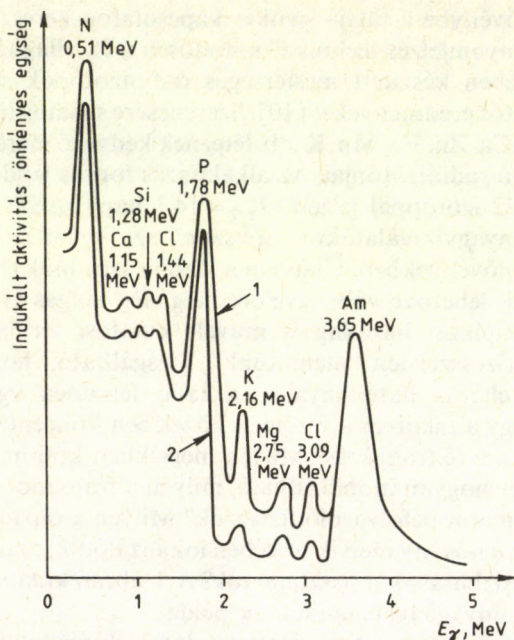
elemek a növénybe a talaj—gyökér kapcsolaton keresztül. A róla elnevezett „nyomjelzés technika” különösen a II. világháború után nagy tömegben készített mesterséges radioizotópok segítségével hozott jelentős eredményeket [10]. Szerencsére számos tápelemnek, mint a P, S, Ca, Zn, Fe, Mn, K stb. léteznek kedvező mérés technikai tulajdonságú radioizotópjai. Az alkalmazás fontos példája a béta-sugárzó P-32 izotóppal jelzett ( $T_{1/2} = 14,3$  nap) foszfát műtrágya, mely tápanyagvizsgálatokra sokszor az egyetlen lehetőség szántóföldi növényekben. Újabban a stabilis izotópok (H, O, C, N) használata is lehetővé vált, egyelőre még elég magas árakon.

Néhány tipikus, hazailag is művelt kutatási területet, illetve feladatot jelzésszerűen felemlítünk. Vizsgálható, hogy melyik trágyázási eljárás hatékonyabb, a talaj felszínén egyenletesen elterített vagy a talajban a vetőmag közelében koncentrált trágya-szer, avagy a levéltrágyázás? Milyen mértékben köti meg a talaj a tápelemet, ez hogyan mobilizálható, milyen a transzport sebessége, mik a folyamatot befolyásoló tényezők? Milyen a tápanyagfelvétel dinamikája, a növény melyik részében lokalizálódik, más elemekkel milyen kereszthatások tapasztalhatók? A 3. ábrán kukorica növény N, P, K tápanyagfelvételére látunk példát.

A felhalmozódott magfizikai tapasztalatok elvezettek *tömeganalitikára* alkalmas eszközökhöz. Az agrokémiai centrumok létesítése külföldön és hazánkban is ma már konkrét hasznot hajtó gyakorlat. A hazai mezőgazdaság a magas terméshozamok érdekében milliárdos értékben használ igen nagy energiaráfordítással előállított műtrágyát. Ennek hatékony érvényesülése fontos népgazdasági érdek, ezért a kötelező talajvizsgálatot az 5/1978. (V. 26) MÉM számú miniszteri rendelet írja elő. A jelenleg alkalmazott eljárás három szakaszra bontható: a mintavételre, a kémiai feltárással végzett vizsgálatra és a vizsgálati eredmények feldolgozásával kiadásra kerülő szaktanácsadásra. A MÉM NAK-által üzemeltetett laboratóriumokat a Labor MIM fejleszti [12].

A fejlesztés folytatódik a kutatóintézetekben is. A potenciálisan felhasználásra kerülő eljárások közül említést teszünk a legegyszerűbb részecskegyorsítóval, a neutrongenerátorral, *kémiai feltárással nélkül*, roncsolásmentesen végezhető N-, P-, K-elemzésekről. A berendezés építésében (neutrongenerátor, csőposta, kapcsolódó





4. ábra. 14 MeV-os gyors neutronnal felaktivált búza szemtermés gamma-spektruma (1), standard Bowen kale-hez viszonyítva (2) [13]

elektronika) hazánkban számottevő tapasztalata van. Az N-, P-, K-meghatározásra vonatkozó analitikai eljárást a moszkvai Prianyisnyikov Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézet fejlesztette ki és alkalmazta eddig már sok ezer talaj- és növényi mintára [13]. A mintatömeg  $\sim 10$  g. A mintát csőposta segítségével a  $10^{10}$ – $10^{11}$  n/s hozamú generátor neutronjaival felaktiváljuk, a keletkező gamma-spektrumot meghatározott időszekvenciák szerint számítógépen értékeljük. A berendezés teljesítménye 250–500 minta/8 óra. A 4. ábrán és a 2. táblázatban 14 MeV-os neutrongenerátorral búza szemtermésében meghatározható N, P, K és néhány más elem (Si, Cl, Ca, Mg) gamma-spektrumát látjuk, standardhoz (Bowen kale) viszonyítva. Az 5. ábrán az analitikai feladathoz alkalmas pneumatikus csőpostarendszer vázlatát tüntettük fel [14].

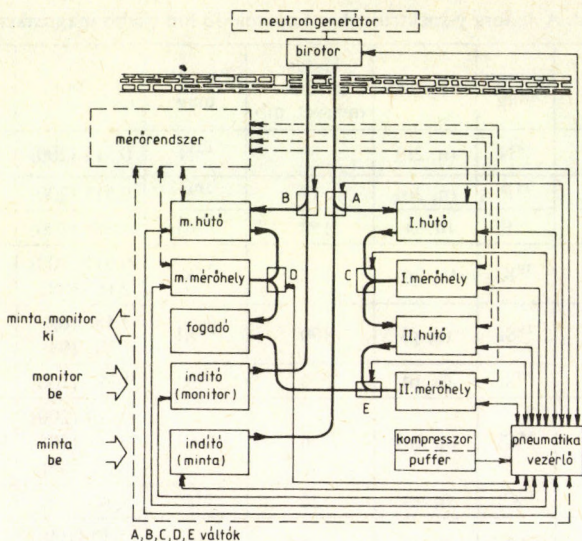
2. táblázat. A 4. ábra  $\gamma$ -spektrumához kapcsolódó fontosabb magreakciók [13]

Elem	Céltárgy- mag	Reakció	Hatás- kereszt- metszet, mb	Termék- mag	$E_\gamma$ , MeV	$T_{1/2}$
Nitrogén	$^{14}\text{N}$	(n, 2n)	6	$^{13}\text{N}$	0,511 (200)	10 min
Foszfor	$^{31}\text{P}$	(n, 2n)	11	$^{30}\text{P}$	0,511 (200)	2,5 min
	$^{31}\text{P}$	(n, $\alpha$ )	150	$^{28}\text{Al}$	1,78 (100)	2,3 min
Kálium	$^{39}\text{K}$	(n, 2n)	2,7	$^{38}\text{K}$	0,511 (200) 2,16 (99)	7,7 min
Szilícium	$^{29}\text{Si}$	(n, p)	100	$^{29}\text{Al}$	2,43 (6) 1,28 (94)	6,6 min
	$^{28}\text{Si}$	(n, p)	200	$^{28}\text{Al}$	1,78 (100)	2,3 min
Klór	$^{35}\text{Cl}$	(n, 2n)	6	$^{34}\text{Cl}$	0,511 (200) 1,16 (18) 2,13 (45)	32,4 min
	$^{37}\text{Cl}$	(n, p)	25	$^{37}\text{S}$	3,09 (90)	5 min
Kalcium	$^{44}\text{Ca}$	(n, p)	2,5	$^{44}\text{K}$	1,15 (100) 2,1 (60)	22 min
Magnézium	$^{24}\text{Mg}$	(n, p)	180	$^{24}\text{Na}$	1,37 (100) 2,75 (100)	15,05 h

$t_{\text{besugárzás}} = 2 \text{ min}$ ,  $t_{\text{hűtés}} = 2 \text{ min}$ ,  $t_{\text{mérés}} = 100 \text{ s}$

A tapasztalat azt mutatta, hogy a növények fejlődését, termés-  
hozamát nemcsak a nagy koncentrációjú N, P, K tápanyagok, de a  
jóval kisebb koncentrációjú Ca, Mg, Na, S vagy a B, Co, Cu, Fe, Mn,  
Mo, Zu, illetve a Cr, Ni, Se, Si, V (Br, I) ásványi elemeknek a jellemző  
koncentrációtól való eltérése — hiánya vagy többlete — is  
befolyásolja. A Föld termőtalajának nagy részén pl. Zn-hiány van,  
más területeken Mn-hiány [15]. Sok tápelem hiánya azonban  
mérések híján észrevétlenül marad, ami nagy kár, mert kezelésére  
rendszerint egyszerű és olcsó megoldások kínálóznak. Nehezíti a  
problémát, hogy a hiány könnyen toxikus koncentrációba csaphat  
át, mivel a toleráns koncentráció rendszerint szűk tartományba esik.  
A növényben toxikus koncentrációban felhalmozódott bioessen-  
ciális elemek hatása nem csupán a termés-  
hozam csökkenésében





5. ábra. Pneumatikus csőpostarendszer növényi minták N, P, K-tartalmának meghatározásához [14]

jelentkeznek, de a táplálkozási láncon keresztül minden más élő szervezetben is, ahol ezek az elemek a nagy molekulák strukturális komponenseként vagy katalizátorként sajátos biológiai hatást fejtenek ki [16]. A nagy érzékenyséű multieleemes neutronaktivációs analízis segít a nyomelem útjának, a talaj—növény—állat—ember kapcsolat és a nyomelemek szerepének tisztázásában. Az említett vizsgálati eljárás (lásd még Szabó Elek és Bakos László tanulmányát) — más módszerekkel együtt — jelentős szerepet vállalt a kutatásokban.

Az 1985-ben üzembe helyezett első magyar ciklotron (Atommag Kutató Intézet, Debrecen) mint radioaktív izotóp előállító berendezés, új lehetőségeket ígér a növényélettani kutatásokban is. Nyomjelzéstechnikával tanulmányozhatók a növényben végbe-menő felépítési (fotoszintézis) és lebontási (légzési) folyamatok, illetve e folyamatokat módosító tényezők hatása. A debreceni

3. táblázat. Áttekintés a kisméretű ciklotronokkal termelhető izotópokról és előállításuk kísérletileg mért hozamairól

Izotóp	Felezési idő	Magreakció	Bombázó energia, MeV	Céltárgy	Termelési hozam, $\mu\text{Ci}/\mu\text{Ah}$	Irodalom
$^7\text{Be}$	53 d	$^7\text{Li}(p, n)$	22	Li	170	a
$^{11}\text{C}$	20 min	$^{14}\text{N}(p, \alpha)$	15	$\text{N}_2(\text{gáz})$	19 000	b
		$^{10}\text{B}(d, n)$	14	$\text{B}_2\text{O}_3$	300 000	c
		$^{12}\text{C}(^3\text{He}, \alpha)$	15–18	$\text{CaC}_2$	2 500	c
$^{13}\text{N}$	10 min	$^{16}\text{O}(p, \alpha)$	18	$\text{H}_2\text{O}$	24 000	c
		$^{12}\text{C}(d, n)$	8	$\text{CO}_2(\text{gáz})$	3 200	b
		$^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)$	30	$\text{N}_2(\text{gáz})$	15 000	c
$^{15}\text{O}$	2 min	$^{14}\text{N}(d, n)$	8	$\text{N}_2(\text{gáz})$	4 600	b
$^{18}\text{F}$	110 min	$^{20}\text{Ne}(d, \alpha)$	8	$\text{Ne}(\text{gáz})$	10 000	c
		$^{16}\text{O}(^3\text{He}, p)$	22	$\text{H}_2\text{O}$	6 000	c
		$^{16}\text{O}(\alpha, d)$	30	$\text{H}_2\text{O}$	1 100	c
$^{22}\text{Na}$	2,6 év	$^{25}\text{Mg}(p, \alpha)$	22	Mg	0,4	a
		$^{23}\text{Na}(p, pn)$	22	Na	3,1	a
$^{30}\text{P}$	2,5 min	$^{27}\text{Al}(\alpha, n)$	15	Al	10 000	b
$^{43}\text{K}$	22 h	$^{40}\text{Ar}(\alpha, p)$	17	$\text{Ar}(\text{gáz})$	57	c
$^{51}\text{Cr}$	28 d	$^{51}\text{V}(p, n)$	15	V	340	b
$^{52}\text{Mn}$	5,7 d	$\text{Cr}(p, xn)$	22	Cr	80	a
$^{52}\text{Fe}$	8,2 h	$^{52}\text{Cr}(^3\text{He}, 3n)$	23	Cr	0,7	b
		$^{50}\text{Cr}(\alpha, 2n)$	30	Cr	3,3	c
$^{56}\text{Co}$	77 d	$\text{Fe}(p, xn)$	22	Fe	70	a
$^{66}\text{Zn}$	244 d	$^{65}\text{Cu}(p, n)$	22	Cu	9,3	a
$^{67}\text{Ga}$	78 h	$\text{Zn}(p, xn)$	15	Zn	77	b
		$\text{Zn}(p, xn)$	22	Zn	430	c
		$\text{Zn}(d, xn)$	8	Zn	30–100	c
		$\text{Zn}(d, xn)$	16	Zn	340	c
		$\text{Zn}(d, xn)$	16	$^{66}\text{Zn}(90\%)$	946	c
$^{73}\text{Se}$	7,1 h	$^{72}\text{Ge}(^3\text{He}, 2n)$	15	Ge	250	b
$^{77}\text{Br}$	56 h	$^{75}\text{As}(\alpha, 2n)$	28	$\text{As}_2\text{O}_5$	160	c
				$\text{As}_2\text{O}_3$	290	c
				As	170	c
$^{81}\text{Rb}$	4,7 h	$^{81}\text{Br}(^3\text{He}, 3n)$	22	NaBr	30	c
		$^{79}\text{Br}(\alpha, 2n)$	30	NaBr	2 000	c
$^{85}\text{Sr}$	65 d	$^{85}\text{Rb}(d, 2n)$	13	RbCl	15	c
$^{88}\text{Y}$	108 d	$^{88}\text{Sr}(p, n)$	22	SrO	20	a
$^{111}\text{In}$	2,8 d	$\text{Cd}(p, xn)$	15	Cd	150	c
		$^{111}\text{Cd}(p, n)$	16	$^{111}\text{Cd}$ (dúsított)	515	c
		$\text{Cd}(p, xn)$	22	Cd	1 035	c
		$\text{Cd}(d, xn)$	12	Cd	117	c
		$^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)$	30	Ag	200	c



3. táblázat folytatása

Izotóp	Felezési idő	Magreakció	Bombázó energia, MeV	Céltárgy	Termelési hozam, $\mu\text{Ci}/\mu\text{Ah}$	Irodalom
$^{123}\text{I}$	13 h	$^{123}\text{Te}(\text{p}, \text{n})$	15	$^{123}\text{Te}$ (77%)	4 000	c
		$^{124}\text{Te}(\text{p}, 2\text{n})$	30	$^{124}\text{Te}$ (dúsított)	40 000	c
		$^{122}\text{Te}(\text{d}, \text{n})$	6–9	$^{122}\text{Te}$ (dúsított)	100	c
		$\text{Sb}(^3\text{He}, \text{xn})$	23	Sb	24	c
$^{123}\text{Xe}$	2,1 h	$^{123}\text{Te}(^3\text{He}, 3\text{n})$	30	$^{123}\text{Te}$ (dúsított)	750	c
$^{127}\text{Cs}$	6,2 h	$^{127}\text{I}(^3\text{He}, 3\text{n})$	22	NaI	500	c
$^{167}\text{Tm}$	9,7 d	$^{167}\text{Er}(\text{p}, \text{n})$	15	$^{167}\text{Er}$ (91%)	38	b
$^{197}\text{Hg}$	65 h	$^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{n})$	12	Au	14	c
			15	Au	36	b
$^{197\text{m}}\text{Hg}$	24 h	$^{197}\text{Au}(\text{p}, \text{n})$	12	Au	15	c
			15	Au	23	b
$^{203}\text{Pb}$	52 h	$^{203}\text{Tl}(\text{p}, \text{n})$	15	Tl	50	c
$^{206}\text{Bi}$	6,2 d	$\text{Pb}(\text{p}, \text{xn})$	15	Pb	100	b
			22	Pb	700	c
$^{208}\text{Po}$	2,9 év	$^{209}\text{Bi}(\text{p}, 2\text{n})$	22	Bi	10	a

a) J. A. MARTIN—R. S. LIVINGSTON—R. L. MURRAY—M. RANKIN: *Nucleonics* **13**, No. 3 (1955) 28.

b) R. S. TILBURY—R. E. BIGLER—L. ZEITZ—J. S. LAUGHLIN: NBS (U. S.) SP 425 (1975) 520.

c) M. A. CHAUDHRI: *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **NS-26** (1979) 2281.

ciklotron mindenekelőtt rövid felezési idejű izotópok előállítására alkalmas (3. táblázat). Így a 20 perces  $^{11}\text{C}$ , a 2 perces  $^{15}\text{O}$ , a 10 perces  $^{13}\text{N}$ , vagy a 10 perces  $^{18}\text{F}$ . Ezeket az izotópokat folyamatosan termelve, s gáz formájában a ciklotron mellé telepített laboratóriumba, vagy üvegházba átvezetve — hazánkban egyedülállóan új élettani vizsgálatokra nyílik lehetőség [17].

### Talaj—növény kapcsolat

A sikeres mezőgazdaság nemcsak produktív talajt — elegendő vizet és tápanyagot —, de produktív növényt is igényel. A természeti növények produktivitásának legfőbb kritériuma a reprodukciós képesség. Ha a reprodukció sikertelen, az összes többi tulajdonság

elveszti jelentőségét, hiszen a növényi egyed kihal a versengő környezetből. Ezért a növény alkalmazkodik a klimatikus adottságokhoz és környezethez. Toleráns a szárazsággal, nedvességgel, hideggel, meleggel, sótartalommal szemben és ellenállóan viselkedik patogén hatásokra is. A *haszonnövények* termelési gyakorlatában produktív növényen olyan stabilis genotípust értünk, amely egy sor más követelménynek is eleget tesz:

— Egyaránt jó *minőséget* ad táplálkozás, takarmányozás, ipari felhasználás, valamint az alkalmazott új technológiák szempontjából (nagyobb növénypopuláció, gépi betakarítás, szárítás, szállítás, tárolás, feldolgozás).

— Az egységnyi területen elérhető hozamok formájában, termelékenyen tesz eleget a *mennyiségi* igényeknek. Hatékonyan hasznosítja a természeti adottságokat (napot, csapadékot) és arányosan meghalálja az emberi ráfordításokat (energia, műtrágya, öntözővíz).

Ebből a rövid, jelzésszerű felsorolásból is kitűnik, hogy a nemesítő munka gyakorlatát a mérő-ellenőrző eszközök bevezetése, a *műszerezettség* fejlődése döntően befolyásolja. A növényi kártevők meghatározása rutinszerűen, mikroszkóppal történik. A cukorrépa kinemesítését a polarométer tette lehetővé. A nagy olajtartalmú magvak nemesítő munkáját elismerten az NMR technika gyorsította fel. A programvezérléses fitotronok a távérzékelő eszközök és mikroprocesszorok, illetve a számítástechnika alkalmazására mutatnak példát.

Ma a legkiemeltebb műszerezési feladat a *nitrogén meghatározása a szemtermésben*. A nitrogén mennyisége egyrészt szoros kapcsolatban van a biológiai anyag által realizált protein mennyiségével és minőségével, másrészt a növényi nitrogénakkumuláció, a protein szintézis regulációs mechanizmusával. Analitikai oldalról nézve a kellően szelektív és termelékeny nitrogénmeghatározó eljárások részben biztosítva vannak, illetve továbbfejlesztésük a megfogalmazódó konkrét feladattól függően folyamatban van.

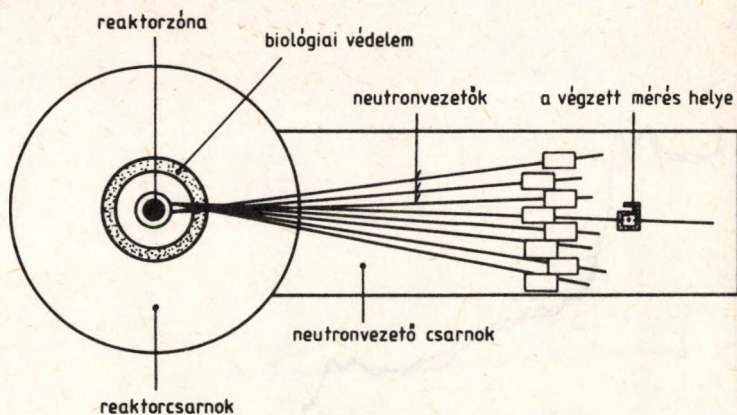
A termés beltartalmi értékének ellenőrzésére, rutinfeladatok elvégzésére leginkább a nedveskémiái eljárások alkalmasak, melyeket automatizáltak. Kitűnik ezek közül az eredeti formájában 100 éve felfedezett Kjeldahl-módszer [18]. Hasonló feladatra szolgál az



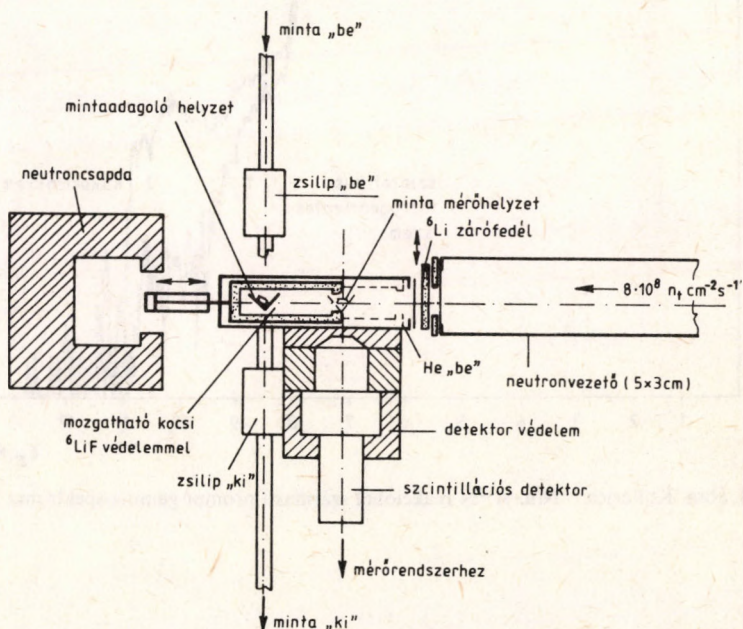
újabban korszerűsített infratechnika darált mintákra [19]. Mindkét eljárással a nitrogén *menyisége* határozható meg. Ide sorolhatjuk a legújabb fejlesztéseket; mindenekelőtt a viszonylag egyszerű, 14 MeV-os neutronokkal végzett roncsolásmentes tömegelemző eljárást [13], és más nagyenergiájú részecskéket (gamma-foton [20], proton és deuteron [21], [22]) alkalmazó módszereket. Ez utóbbi technikák esetében egyrészt homogenizált gabonaliszt, másrészt a szemén belüli nitrogénkoncentráció-profil meghatározásáról számoltak be. Sok munkát publikáltak a protonokkal indukált röntgenemissziós eljárásról (PIXE), ahol a hagyományos röntgenfluoreszcencia esetében tapasztalható  $Z=20$  határt igyekeznek lejjebb szorítani. Mindezek a törekvések érthetővé válnak, ha figyelembe vesszük egy kanadai szakember véleményét, aki szerint csupán a kanadai gabonaipar állami minőségellenőrző munkájában évente 1 millió protein- (nitrogén-) meghatározásra van szükség.

Amennyiben a kérdéses nitrogénatom kémiai kötöttségi állapotáról is informálódni kívánunk, a feladat rendkívül bonyolulttá válik megfelelően annak, hogy a nitrogén kémiailag rendkívül verzatilis elem. Oxidációs száma  $-3$ -tól  $+5$ -ig változhat, és szinte minden elemmel képes vegyületet alkotni. A mezőgazdasági kutatások tipikus eszközei az aminosav-analizátor [19], az elektroforézis technika [23], újabban az NMR [24], és az ESCA módszerek [25].

A felsorolt nitrogénmeghatározó módszerek többsége a nemesítő munkában is hasznosíthatók. Az IAEA 1969—79 között 8 idevágó konferenciát szervezett, hogy koordinálja azokat a kutatásokat, ahol fizikai módszereket alkalmaznak azzal a célkitűzéssel, hogy növeljék a növényi protein termés mennyiségét és javítsák annak minőségét [26, 27]. Kapcsolódva ezekhez az erőfeszítésekhez a KFKI Franciaországban a Laue—Langevin Intézet nagyfluxusú reaktoránál új nitrogénmeghatározó eljárást dolgozott ki [28, 29]. A 6. és 7. ábrán a Grenoble-i Laue—Langevin Intézet HFR reaktorának neutronvezető csarnoka és a mérési elrendezés van feltüntetve. A nagy ( $8 \cdot 10^8$  n/cm<sup>2</sup> s) tiszta termikusneutron-fluxus lehetővé teszi, hogy a mintaméretet egyetlen gabonaszemre redukáljuk. A vizsgálat roncsolásmentes, mivel sem kémiai, sem fizikai processzálásra nincs szükség a mintaelőkészítés során. A mérés alatt

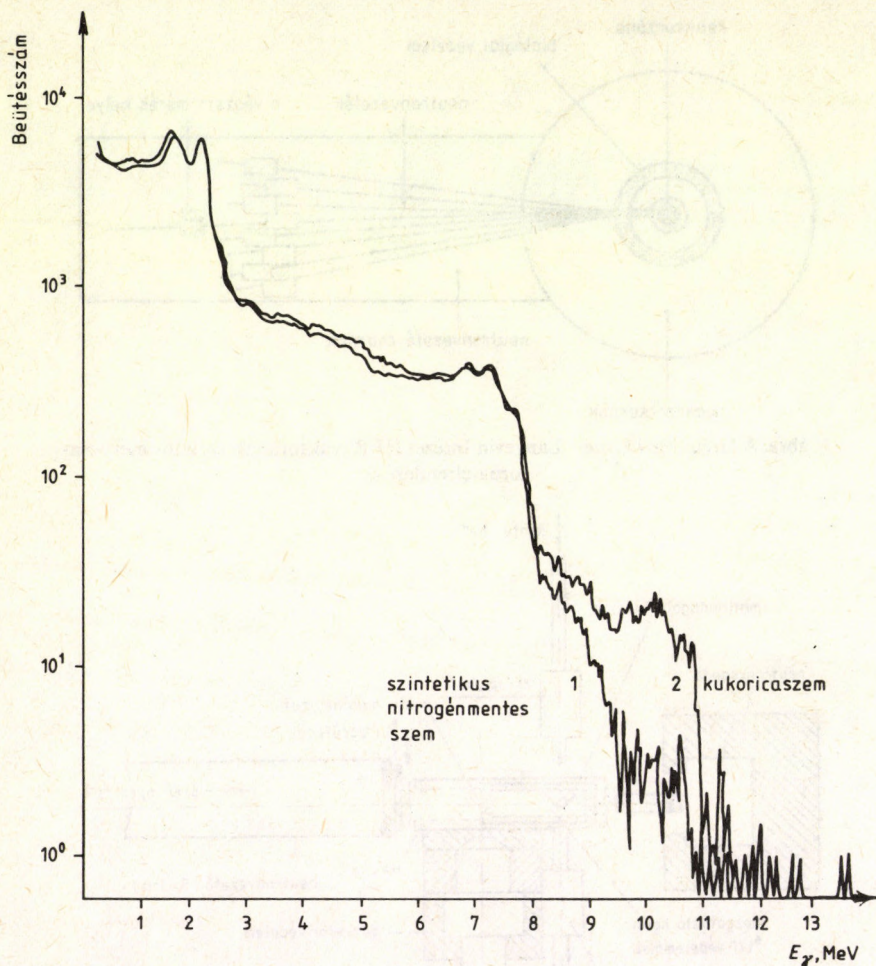


6. ábra. A Grenoble-i Laue—Langevin Intézet HFR reaktorának vázlatos mérőcsatorna-elrendezése

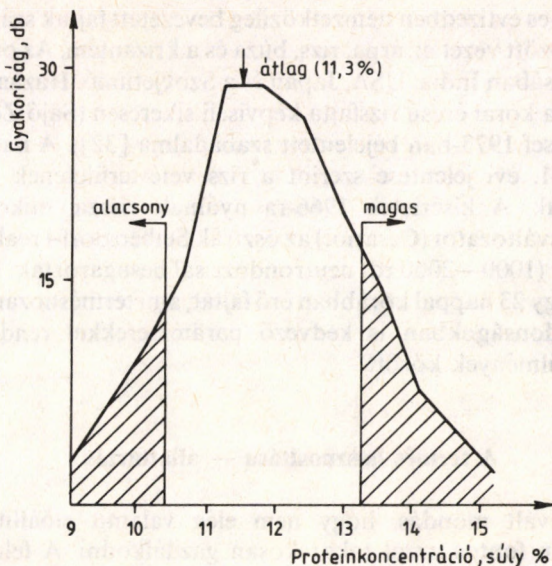


7. ábra. Mérési elrendezés kukorica proteinkoncentrációjának szemenkénti meghatározására. A neutronvezető cső keresztmetszete 5 cm x 3 cm





8. ábra. Kukorica  $^{14}\text{N}(n, \gamma)^{15}\text{N}$  reakcióból származó prompt gamma-spektruma



9. ábra. A proteinkoncentráció eloszlása az „A632”-jelű populáción belül

elszenvedett sugárdózis elegendően alacsony ahhoz, hogy elkerüljük számottevő mutáció létrejöttét vagy a csírázóképeség csökkenését. A detektor a  $^{14}\text{N}(\text{n}, \gamma)^{15}\text{N}$  magreakcióból kiváltott prompt gamma-sugárzást méri alkalmas etalonhoz viszonyítva. A mérési idő 1 perc. A minta adagolása és a mérés kiértékelése teljesen automatizálható. A 8. ábrán tipikus gamma-spektrumot, a 9. ábrán tipikus koncentrációeloszlást látunk adott nemesítési anyagon belül. Mintegy 5000 szem vizsgálata történt meg kukorica proteinkoncentrációjára vonatkozóan. A magokat a nemesítők visszakapták a méréseredményekkel együtt.

A merítési bázis növelésére, a genetikai variabilitás szélesítésére már rég használják a növénynemesítők a mesterségesen, pl. sugárzással indukált mutáció technikáját. Ezelőtt röntgensugárzást, ma főleg gamma- és neutronsugárzást használnak a mutáció kiváltására (mintegy 10:1 arányban). A bevezetett mutáns variánsok száma egyre nő [30, 31].

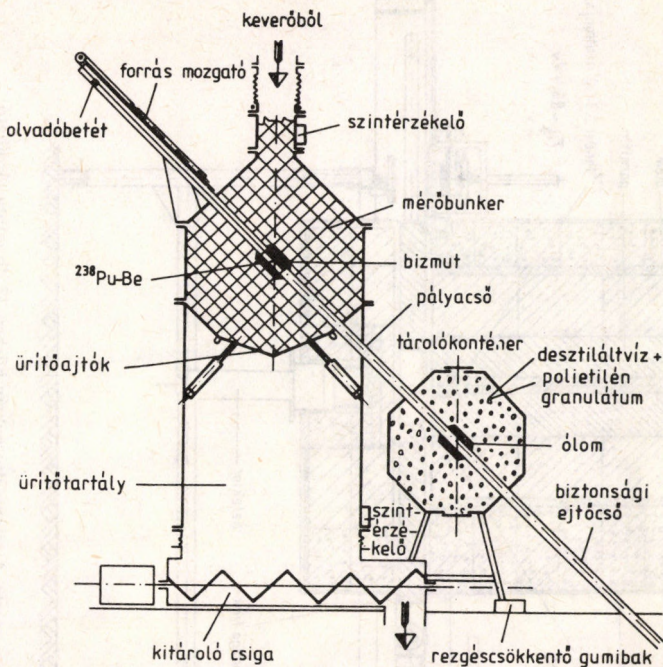


Az 1970-es évtizedben nemzetközileg bevezetett fajták száma 141. E fajták között vezet az árpa, rizs, búza és a krizantém. Az országok vonatkozásában India, USA, Japán és a Szovjetunió. Hazánkat egy Nucleoryza korai érésű rizsfajta képviseli sikeresen (Sajó Zoltán és Simon József 1973-ban bejelentett szabadalma [32]). A nádudvari KITE 1981. évi jelentése szerint a rizs vetésterületének 72%-án hasznosítják. A kísérletek 1966-ra nyúlnak vissza, mikoris egy francia rizsváltozatot (Cesariot) az osztrák Seibersdorf-i reaktorban 10—20 Gy (1000—2000 rd) neutron dózissal besugároztak. Végül is izoláltak egy 23 nappal korábban érő fajtát, ami terméshozamban és más tulajdonságokban is kedvező paraméterekkel rendelkezett hazai körülmények között.

### A termés hasznosítása — állattartás

Régi bevált mondás, hogy nem elég valamit előállítani, de ugyanolyan fontos azzal takarékosan gazdálkodni. A felmérések mégis azt mutatják, hogy különböző okok miatt a betakarított növényi termés egynegyede veszendőbe megy, és mi világméretekben ennyivel többet termelünk, hogy kompenzáljuk a veszteségeket. Még különösebb hangsúlyt kap ez, ha a jól ismert fehérjekérdésről van szó. Hazai vonatkozásban két dologra kell világosan rámutatni. Az egyik az, hogy a fő növényi fehérje fogyasztó nem közvetlenül az ember, hanem zömében az állattartás. Így a veszteségeket tehát itt kell keresni. A másik, hogy hazánkban — több más országhoz hasonlóan — nehezen tudunk fehérjében gazdag takarmányt előállítani. Kukorica- és búzatermésünk fehérjekoncentrációja 12% alatt van. Takarmányokban ugyanakkor e feletti koncentrációra van szükség [35].

A KFKI által kifejlesztett contiPRODET és autoPRODET berendezések (10. és 11. ábrák) keverőtelepeken hasznosíthatók a termék fehérjekoncentrációjának ellenőrzésére [33, 34]. A berendezés zárt neutronforrással működik. A detektorok a neutron által kiváltott prompt gamma-sugárzást mérik a  $^{14}\text{N}(n, \gamma)^{15}\text{N}$  magreakcióból. A minta súlya itt 100 kg, illetve 1 kg és a meghatározás ideje 10, illetve 30 perc. A berendezések elkészítésére a Gabona Tröszt

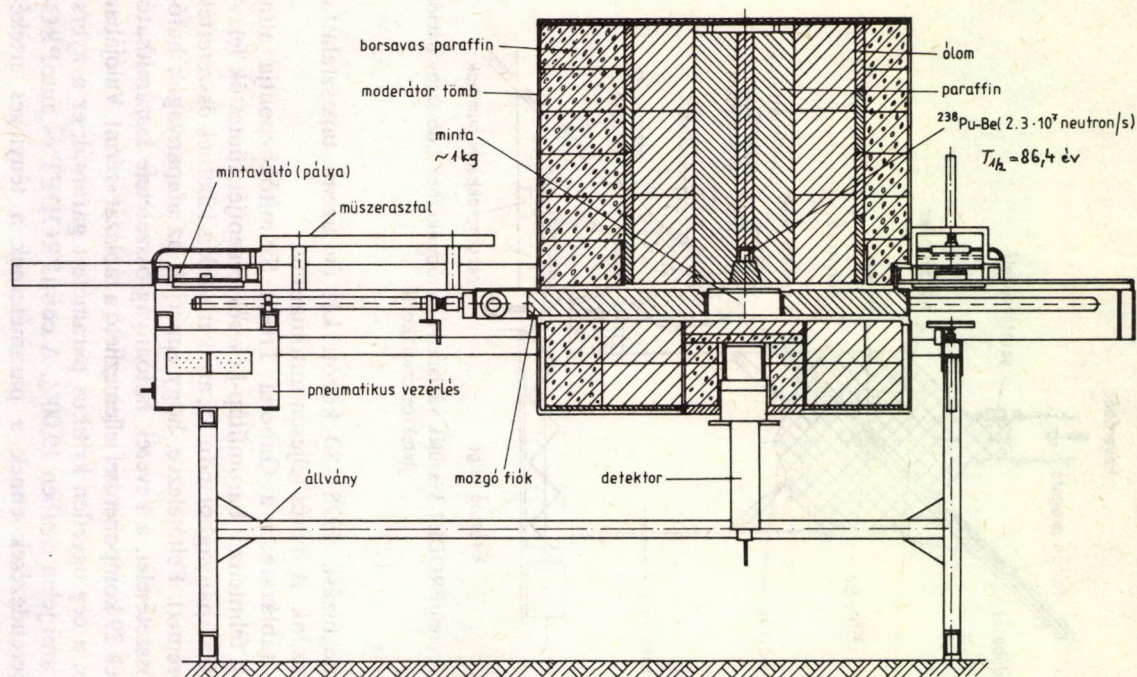


10. ábra. A contiPRODET készülék vázlata. A mérőbunkerhez 2 db szcintillációs detektor csatlakozik

adott megbízást. 1978—80 között két év üzemi tapasztalattal rendelkezünk. A mérés teljesen automatikus.

A 4. táblázatban a Gabona Tröszt Számítóközpontja által kalkulált félintenzív baromfitáp-keverék receptjét tüntettük fel. A recept 10 alapanyagból indul ki, amik maguk is lehetnek összetettek (pl. a premix). Feltételezve, hogy ismerjük az alapanyagok hatóanyag-összetételét, a keverék hatóanyag-összetétele kiszámítható. A keverék 29 komponenssel jellemezhető a táblázat szerint. Valójában azonban a cég egyetlen kritikus paramétert garantal; ez a nyersfehérje, ami jelen esetben 19,00%. A contiPRODET és autoPRODET berendezések ennek a paraméternek a tényleges értékét határozzák meg.





11. ábra. Az autoPRODET készülék metszete. A mintaváltó pályán körben 32 db minta tárolható

4. táblázat. Gabona Tröszt Számítóközpont. Receptlap

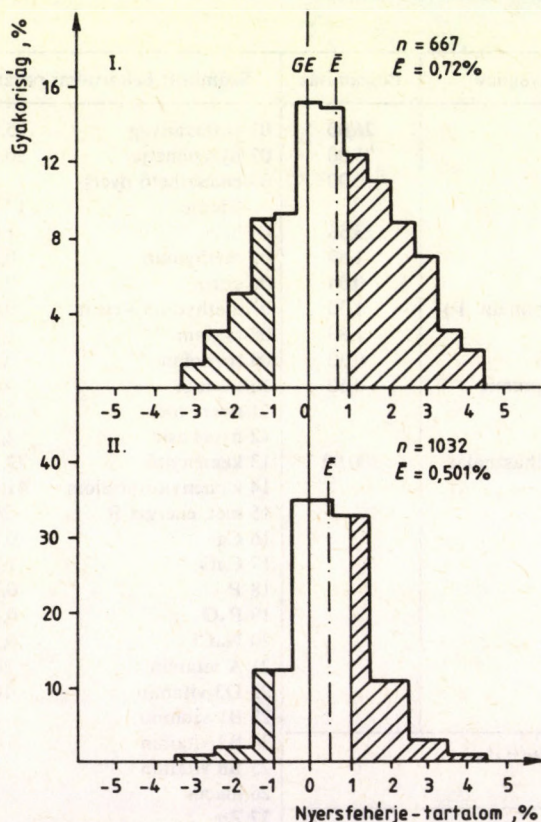
Kimutatás forrása: RECE21 recept file  
 Kimutatás dátuma: 1981. 03. 18.  
 Termék megnevezése: félintenzív baromfi nevelőtáp alt. hap  
 Termék ITJ száma: 84-51-11-102-23  
 Recept azonosító: 111023-23  
 Recept érvénybe lépésének ideje: 1981. 03. 15.

Összetétel:

Alapanyagnév	Beszámítás	Számított beltartalmi paraméterek	
Kukorica	26,00	01 szárazanyag	85,548 %
Búza	35,00	02 nyersfehérje	20,219 %
Árpa	10,00	03 emészthető nyersfehérje	17,971 %
Szója 48%	23,56	04 lisin	1,076 %
Halliszt 70%	1,50	05 methyonin	0,362 %
Methyonin	0,04	06 cistin	0,308 %
H-AP17 (Gabonaip. T.)	1,30	07 methyonin + cistin	0,670 %
Mész	1,80	08 arginin	1,225 %
Takarmánysó	0,30	09 triptofan	0,272 %
2. Bfi nev. e. premix	0,50	10 treonin	0,852 %
		11 nyers rost	2,570 %
		12 nyers zsír	2,768 %
Alapanyag-felhasználás	100,00	13 keményítő	72,767 %
		14 keményítőtartalom	41,121 %
		15 met. energia-B	2990 kg/cal
		16 Ca	0,829 %
		17 CaO	1,167 %
		18 P	0,384 %
		19 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,872 %
		20 NaCl	0,300 %
		21 A vitamin	8000 NE
		22 D3 vitamin	1600 NE
		23 B1 vitamin	2 mg
		24 B2 vitamin	4 mg
		25 B6 vitamin	3 mg
		26 niacin	25 mg
		27 Zn	40 mg
		28 Mn	70 mg
		29 Fe	10 mg
Garantált beltartalmi paraméterek		E faktor	0,889
		K faktor	1,231
Szárazanyag%	86,000		
Nyersfehérje%	19,000		
Keményítő érték%	72,500		
Nagyker. ár, Ft/100 kg:	648		



Az autoPRODET berendezéssel szerzett üzemeltetési tapasztalatok egy része jól összegezhető a 12. ábrán feltüntetett méréseredményekkel. Az ábra felső részén az első év mérésadatai (667 db mérés), az alsó részen pedig a második év mérésadatai (1032 db mérés) vannak ábrázolva. A keveréktakarmány nyers fehérjetartalmának



12. ábra. A keveréktakarmány-gyártó üzem minőségellenőrző laboratóriumában vizsgált mintáknál a mért nyersfehérje-tartalom és a garantált érték közötti eltérés gyakorisági megoszlása. GE a garantált érték;  $\bar{E}$  az eltérések súlyozott átlaga,  $n$  a vizsgálati mintaszám. Az I. időszak 1978—79., a II. időszak az 1979—80. években egy-egy évet jelent

garantált értéke (GE) és ellenőrzött értéke (E) közötti eltérés az első évben olyan, hogy átlagban +0,72 protein% adódik. Az elosztás félszélessége pedig mintegy 7 protein%. A második évben az átlagos eltérés, *a gyakoribb és gondosabb ellenőrzés következtében* +0,5 protein%-ra csökken, és ami ennél lényegesebb, az átlagtól való eltérés is csökken az eredeti értéknek mintegy felére. A jobb oldali csökkenés a keverőüzem használatára, mert kevesebb proteinkonzentrátumot használtak el. A bal oldali csökkenés a felhasználóé, mert eredetileg garantált érték alatti tápot kapott, és most a garantálthoz jobban közel esőt. Az első autoPRODET berendezés a Csongrád megyei Gabonaforgalmi Vállalat Szeged melletti üzemében van felállítva, amelynek takarmánykeverék-termelő kapacitása 20 000 t/év. A második Szentesen 60 000 t/év kapacitással üzemel.

### Irodalom

1. А. Ф. Йоффе: Основы агрофизики. Изд. Физ-мат, Москва, 1959.
2. W. B. SUNDQUIST—K. M. MENZ—C. F. NEUMEYER: A Technology Assessment of Commercial Corn Production in the United States, Station Bulletin (1982) 546. Agricultural Experiment Station. University of Minnesota.
3. W. R. GASSER: Survey of Irrigation in Eight Asian Nations: India, Pakistan, Indonesia, Thailand, Bangladesh, South Korea, Philippines and Sri Lanka. USDA, FAE Report No 165, Washington, DC. (1981).
4. International Atomic Energy Agency Bulletin. Vienna, September (1981) 31.
5. A. Z. NAGY—T. RÁZGA: J. Sci. Instrument **43** (1966) 383—387.
6. FÁBIÁN Zs.—SAMU M.: Gyorsnedvességmérők összehasonlító vizsgálata. MÉM Műszaki Intézet, Gödöllő (1980). (Vizsgált típusok: Super Matic, Burrows-100, Dickey John, KM Tester, Cera Tester, Wiele 35)
7. W. C. STEERE—W. C. LEVENGOOD—J. M. BONDIE: Seed Sci. and Technol. **9** (1981) 567—576.
8. C. J. TUCKER et al.: The Relationship of Red and Photographic Infrared Spectral Data to Grain Yield Variation Within a Winter Wheat Field. NASA Technical Memorandum 80318 (1979) Maryland.
9. World Agriculture, Outlook and Situation, USDA ERS Report WAS-26, September (1981) Washington, DC.
10. P. B. VOSE: Introduction to Nuclear Techniques in Agronomy and Plant Biology. Pergamon Press, New York, 1980.
11. I. ARNON: Mineral Nutrition of Maize. International Potash Institute, Bern, 1975, p. 149.
12. Az egységes talajvizsgáló rendszer és a TVG laboratóriumi hálózat. MÉM NAK és Labor MIM kiadvány, Budapest, 1980.



13. R. A. SRAPENYANTS—K. BERNSTEIN: N, P, K Determination in Grain and Plant Samples by Activation Analysis. Annual Meeting of the American Association of Cereal Chemists (1976).
14. EGRI B.—CSÖKE A.: személyes közlés.
15. A. SZALAY—R. SAHNINEN—Z. SÁMSONI: Acta Alimentaria **10** (1981) 417—424.
16. G. PETHES: Elemental Analysis of Biological Materials: Current Problems and Techniques with Special Reference to Trace Elements. IAEA Techn. Rep. Series No 197 (1980) 3—18.
17. MAHUNKA I.: Kísérleti ciklotronok mezőgazdasági alkalmazásának lehetőségei. Sugártechnikai módszerek alkalmazása a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban. ATOMKI Report X/5 (1983).
18. R. ANNAND et al.: International Laboratory, Nov./Dec. (1976) 41—53.
19. Labor MIM: személyes közlés.
20. D. BRUNE et al.: Anal. Chem. Acta **89** (1977) 267—269.
21. L. GÖNCZI et al.: The  $^{14}\text{N}(\text{d}, \text{p})^{15}\text{N}$  nuclear reaction method for nitrogen depth distribution measurements in wheat and barley. Tandem Accelerator Laboratory, Uppsala, Sweden. TLU Report 74 (1980).
22. Z. SZÓKEFALVI-NAGY—S. DEMETER—L. VARGA—K. HOLLÓS-NAGY—L. KESZTHELYI: Elemental analysis of samples of biological oxigen relative to their protein content by means of charged particle bombardment. KFKI Report 81—26 (1981).
23. J. W. PAULIS: F. Agr. Food Chem. Jan./Febr. (1982) 14—20.
24. J. MASON: Chem. Rev. **81** (1981) 205—227.
25. D. BERÉNYI: Some New Nuclear Methods and their Applications in Agricultural Research and Practice. Address at the Meeting of European Society of Nuclear Methods in Agriculture (ESNA), Debrecen (1980)
26. Seed Protein Improvement in Cereals and Grain Legumes (Proc. Neuherberg 4—8, Sept. 1978). IAEA, Vienna, 1979.
27. E. G. NIEMANN: Atomic Energy Review **18** (1980) 125—170.
28. L. ANDRÁS—A. BÁLINT—A. CSÖKE—A. Z. NAGY: KFKI Report 78—38 (1978) és Növénytermelés **28** (1979) 125—130.
29. CSÖKE A.: személyes közlés.
30. PÁSZTOR K.: Gyorsítók alkalmazási lehetőségei a növénynevelésben. Az atomenergia és magkutató újabb eredményei, 1. kötet. Szerk.: KOLTAY E. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983, 12—31. old.
31. BÁLINT A.: Heterózis és mutáció a kukoricában. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1967.
32. SAJÓ Z.—SIMON J.: Korai érésű rizsfajta. OTH 165872/1973.
33. ANDRÁS L.—CSÖKE A.—BAKOS L.—DEME S.—NAGY Á.: Eljárás nitrogén, kálium, foszfor tartalmú összetett anyagok meghatározására. OTH-MA-2340, 2573/1973.
34. CSÖKE A.: személyes közlés.
35. I. LÁNG—ZS. HARNOS—A. Z. NAGY—I. VÁLYI: International Agrophysics **1** (1985) 5—22.

# A neutron a mesterséges radioaktív izotópok hazai alkalmazásában

Veres Árpád

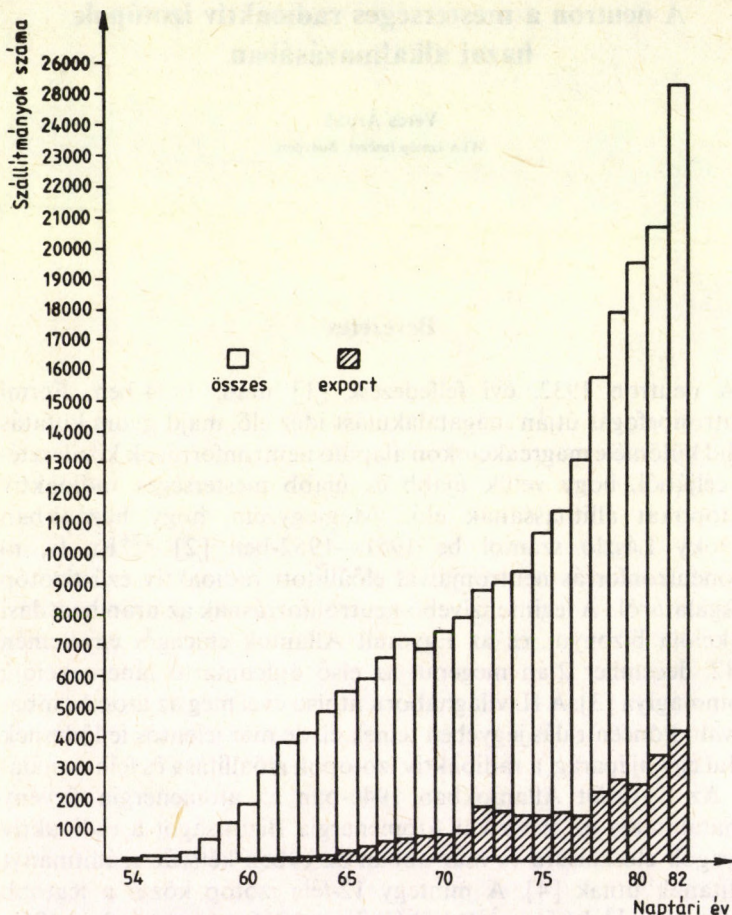
MTA Izotóp Intézet, Budapest

## Bevezetés

A neutron 1932. évi felfedezése [1] után, 1934-ben, Fermi neutronbefogás útján magátalakulást idéz elő, majd gyors kutatás indul különféle magreakciókon alapuló neutronforrások kifejlesztése céljából, hogy velük újabb és újabb mesterséges radioaktív izotópokat állíthassanak elő. (Megjegyzem, hogy hazánkban Bozóky László számol be 1951—1952-ben [2]  $^{226}\text{Ra}$  ( $\gamma$ , n) fotoneutronforrás neutronjaival előállított radioaktív ezüstizotóp vizsgálatáról.) A legintenzívebb neutronforrásnak az urán hasadási reakciója bizonyul, és az Egyesült Államok chicagói egyetemén 1942. december 2-án megépül az első önfenntartó láncreakciójú atommáglya [3]. A II. világháború utolsó éveit még az atombombára való koncentráció jegyében telnek el, de már jelentős fejlődésnek indul egy új iparág, a radioaktív izotópok előállítása és felhasználása. Az Egyesült Államokban 1946-ban az atomenergia-törvény felhatalmazza az Amerikai Atomenergia Bizottságot a radioaktív anyagok elosztására és már abban az évben kétszáz szállítmányt indítanak útnak [4]. A mintegy 12-féle izotóp közül a legtöbb szállítmány  $^{131}\text{I}$ -ből és  $^{32}\text{P}$ -ből áll, és az 1946. augusztus 2. és 1951. december 31. közötti, első időszak 20 000 szállítmányának aktivitása meghaladja a 85 TBq-t (2300 Ci). A Szovjetunióban 1948-ban külön intézet felállításával indult meg és terjedt el széleskörűen a radioizotópok előállítása és alkalmazása [5].

Magyarországon az első mesterséges radioizotóptételek 1954-ben szovjet importból származtak, és felhasználásuk a Magyar Tudományos Akadémia Központi Izotópbizottságának felügyelete





1. ábra. Az izotópforgalom alakulása 1954—1982 között

mellett folyik. Ezt a feladatot 1956-tól az Országos Atomenergia Bizottság (OAB) vette át. A Központi Fizikai Kutató Intézet kutató atomreaktorának üzembehelyezése, és az Izotóp Intézet 1959-es megalapítása után, az 1960-as évektől indul rohamosabb fejlődésnek a radioizotópok hazai előállítása és felhasználása (1. ábra).

## Mesterséges radioaktív izotópok előállítása és alkalmazása a 60—70-es években

Az 1960-at megelőző hat év alatt az 1954. évi 30 készítményről az összes szállítmányok száma négyezerrel nőtt. Megrendezték az első (1958), majd a második (1961) izotópkalkalmazási konferenciát [6, 7]. Míg az előbbin főleg a nukleáris műszerek és védelemtechnikai eszközök fejlesztésével foglalkoztak, az utóbbin már 121 előadás hangzott el ipari, mérés technikai, sugár- és más kémiai, orvosi, valamint biológiai vizsgálatok eredményéről. A reaktorbesugárzással előállított radioizotópok túlsúlyba kerültek, és a  $(n, \gamma)$  és  $(n, p)$  reakcióval előállított radioizotópok 95—98%-ban közülük kerültek ki.

Öt, az izotópkalkalmazás szempontjából közepesnek tekinthető nyugat-európai ország izotópfelhasználásának a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) által közzétett 1962. évi átlagával összehasonlítottuk helyzetünket a nyolc leggyakrabban alkalmazott radioizotópra, több állammal pedig az összes izotópfelhasználás alapján (1. és 2. táblázat). Az 1. táblázatból messzebbre mutató következtetést nehéz levonni, mert a nagyobb aktivitásfelhasználás az alacsonyabb mérés technikai kultúrából is adódhat. A 2. táblázatban, a nagyobb számok miatt, ez az ok már elhanyagolható, és így ebből a táblázatból már realisabban ítéltjük megfelelőnek helyzetünket.

1. táblázat. Néhány radioizotóp felhasznált aktivitása 10 millió főre vonatkoztatva

Radioizotóp	Öt ország felhasználási átlaga		Hazai felhasználás	
	GBq	Ci	GBq	Ci
$^{131}\text{I}$	185—370	5—10	729	17
$^{198}\text{Au}$	185—370	5—10	370	10
$^{32}\text{P}$	37—74	1—2	429	11,6
$^{51}\text{Cr}$	3,7—7,4	0,1—0,2	96,2	2,6
$^{24}\text{Na}$	3,7	0,1	130	3,5
$^{59}\text{Fe}$	0,185	0,005	18,5	0,5
$^{35}\text{S}$	7,4	0,2	311	8,4
$^{14}\text{C}$	1,85	0,05	44,4	1,2



2. táblázat. A felhasznált radioizotópok értéke ezer dollárban, 1962-ben

Ország	Lakosság, millió fő	A felhasznált izotópok értéke	10 millió főre vonatkoztatva
Anglia	52	2 100	400
Svájc	5,2	200	385
Franciaország	47	600	127
Belgium	9	100	110
NSZK	55	500	90
Olaszország	51	250	49
Spanyolország	30	25	8
A többi nyugateurópai állam	70	546	78
Együtt	319,2	4 321	135
USA	180	13 000	720
Magyarország*	10	210	210

\* 1 \$ = 40 Ft átszámítási kulcsot alkalmaztunk, miután a tőkés relációból beszerzett izotópok folyóforintértéke ez volt, és mind a szocialista importár, mind a hazai ár a világpiaci árnak felelt meg.

Később további konferenciákra és szimpóziumokra került sor. Általános jellemzőjük az volt, hogy minden nagyobb alkalmazási terület saját rendezvényt tartott. Ilyen volt 1963 őszén a Sugárvédelmi Kollokvium [8] Budapesten, majd 1964 őszén Mátrafüreden a Sugárvédelmi Iskola [9] és Karlovy Varyban a radioaktív gyógyászati készítmények aktivitásmérésével és biológiai ellenőrzési módszereivel foglalkozó KGST-szimpózium [10]. 1966-ban, ugyancsak Budapesten, analitikai kémiai konferencia keretében ismertettek számos aktivációs analitikai módszert és eljárást [11], és ezt osztrák—magyar sugárvédelmi szimpózium követte [12]. A nukleáris medicinában alkalmazott módszerek és eszközök KGST-szimpóziума [13] mellett több más hazai rendezvényen kapott helyet a radioaktív izotópok alkalmazása, mint például az 1968-as urológiai és neurológiai kongresszuson, vagy a veszprémi „Tudomány a vegyipar szolgálatában” című rendezvényen. Külön rendezvény szolgált 1969-ben a radioaktív izotópok tudományos kutatásban betöltött szerepének bemutatására [14], továbbá Varsóban a radioaktív készítmények új előállítási módszereinek

ismertetésére [15]. 1970-ben nukleáris gépészeti konferenciát [16], a defektoszkópok fejlesztésével foglalkozó KGST-szimpoziumot [17] és a nagy teljesítményű sugárforrások felhasználását, a mezőgazdasági termékek tartósítását, orvosi eszközök sterilizését, valamint műanyagipari termékek előállítását elemző konferenciát [18] rendeztek.

Ezt a mind szélesebb alkalmazást 1970-ben már évi 7750 izotópszállítmány jellemezte.

Az 1960-as évek vége felé egyes minisztériumok 3—5 évre szóló radioizotóp-alkalmazási célprogram megvalósításába fogtak. A Kohó- és Gépipari Minisztérium célprogramja, amely az 1969—1973-as évekre szólt, 35 vállalatot érintett, és 75 millió forintot irányzott elő mintegy 150 új módszer kidolgozására. Az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium 21 témát fogalmazott meg, és vizsgálatukban öt intézet vett részt. A fedezetet 50%-ban a vállalat, 50%-ban a minisztérium biztosította. Ez is, és az Országos Vízügyi Hivatal célprogramfeladatai is már átnyúltak a hetvenes évekbe.

### Az 1970—1980-as évek

A célprogramok teljesítése során az ipari igény jelentősen megnőtt. Az üzemek megismerték az új módszert, és ez erjesztőleg hatott napi fejlesztési gondjaik megoldásában is. Egyre több olyan igény merült fel, amelynek költségét az üzem egyedül is hajlandó volt vállalni. Átalakult az alkalmazás képe. A sok vállalatot összefogó és sok módszer kidolgozását célul kitűző célprogramok megszűntek, és az egyedileg igényelt fejlesztés lépett helyükbe. Az 1976-ban induló ötéves terv időszakában már csak egy-egy konkrét feladat megoldására irányuló, tárcatámogatást élvező programot indítottak.

Az analitikai módszerek, amelyeknek a bevezetés kezdeti szakaszában a Központi Fizikai Kutató Intézet volt a bázisintézménye, kiszélesedtek. Akadémiai és ipari kutatóintézetek, egyetemi tanszékek és intézetek, valamint vállalati laboratóriumok foglalkoztak több nagy feladat megoldásához szükséges vizsgálati módszer kidolgozásával. A roncsolásmentes anyagvizsgálatban, néhány



különösen nehéz feladattól eltekintve, több üzemi részleg vált alkalmassá saját fejlesztési igényének kielégítésére.

A sugártechnika területén a sterilizálás, polimerizáció, mutáció stb. vizsgálata folyt ebben az időszakban, de még máig sem használták ki a bennük rejlő lehetőségeket.

Az orvosi alkalmazásnál a terápiáról a diagnosztikára, a technécium-generátorok, az in vivo és in vitro készletek (kitek) felhasználására tevődött át a hangsúly.

Általánosságban azt mondhatjuk, hogy az izotópalkalmazás területei kialakultak, a nukleáris módszerek mintegy „leülepedtek”, elfoglalták helyüket, egyre több eredményt szolgáltatva a népgazdaság termelési, egészségügyi és kutatási szférájában.

## **Az izotópalkalmazás főbb jellemzői**

### **Orvosi alkalmazás**

Az Országos Atomenergia Bizottság, az Egészségügyi Minisztérium és a Magyar Tudományos Akadémia korábbi orvosi izotópalkalmazási bizottságai feladatkörének egy részét — nevezetesen a kutatás, módszerfejlesztés és klinikai kipróbálás eredményeit bemutató nemzetközi és hazai rendezvények szorgalmazását és ápolását — a Magyar Orvostudományi Nukleáris Társaság vette át. Az Egészségügyi Minisztérium szakintézetei különféle fejlesztési elképzeléseket dolgoztak ki, az izotóp- és műszerellátást biztosító intézményekkel együttműködve. A legszükségesebb teendőkről összegező tanulmány készült, melynek alapján Országos Középtávú Kutatási-Fejlesztési Terv keretében alprogramot hagytak jóvá a hazai radiofarmakon-ellátás érdekében.

### **Sugárterápia**

A vizsgálatokat a számítógépes országos besugárzás-tervezési hálózattal modernizálták. Hazánk teleterápiás berendezései az Állami Számítástechnikai Szolgálat Honeywell—Bull számítógépével terminálos összeköttetésben állnak. Az EXTDOS program a közölt adatokból kiszámítja a több mezős besugárzás eredő

dóziseloszlásának térképét és a besugárzási időt, figyelembe véve a beteg testkeresztmetszetét, a mező nagyságát, a daganat elhelyezkedését, a megadott besugárzási irányokat, az alkalmazandó ékszűrőket, a testen belüli inhomogenitást, a súlyfaktorokat, a félárnyék-szélességet, a fókusz és a bőr közötti távolságot, a sugárforrás bomlását stb. A sugárterápiás kezelés lehetősége (az országban 11  $^{60}\text{Co}$ - és két  $^{137}\text{Cs}$ -ágyú működik) azonban még mindig alatta marad az Egészségügyi Világszervezet által optimálisnak tartott értéknek: az egy millió lakosra javasolt két  $^{60}\text{Co}$ -berendezésnek, egy 30—50 MeV és egy 6—10 MeV energiájú gyorsítónak.

A nagy besugárzóberendezések mellett mikrogömböcskékben alkalmazott, kisebb aktivitású orvosi applikátorokat is alkalmaznak rutinszerűen. Nem túl nagy mennyiségben  $^{32}\text{P}$ -t,  $^{131}\text{I}$ -t,  $^{198}\text{Au}$ -t és néhány más izotópot radiofarmakonként használnak terápiás célra.

### Diagnosztika

Több mint száz kórház és klinika foglalkozik diagnosztikai vizsgálattal. Az in vivo módszerekkel mintegy 15 szerv (agy, pajzsmirigy, tüdő, máj, vese, lép, csont stb.) vizsgálatára kb. 55 készítményt alkalmaznak, közülük a legelterjedtebb a  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -készletek felhasználása. A felhasználás jellemzésére a 3. táblázatban bemutatjuk a technéciumkészletek 1981—1982. évi felhasználásának fontosabb adatait. A megyei centrumok kialakításával 19 vidéki és 8 budapesti gyógyítóhely rendelkezik már széles körű vizsgálatra alkalmas, számítógépes kiértékelésű és színes képmegjelenítő gamma-kamerával, amely igen korszerű technéciumos vizsgálati feltételeket biztosít.

Az in vitro radioimmunanalitikai (RIA) készletek különösen széles körben terjednek. Egyik nagy előnyük, hogy a vizsgált személy nem kerül kapcsolatba radioaktív anyaggal, a másik, hogy lehetőséget ad igen érzékeny és eddig nem vagy csak nagyon bonyolultan elvégezhető vizsgálatokra. E módszerek bevezetésével szélesedik az izotópos diagnosztika területe a gyermekgyógyászatban, országos szűrővizsgálati módszereket dolgoznak ki újszülött pajzsmirigy-



3. táblázat. A technéciumkészletek fontosabb adatai\*

A készlet neve	Hatóanyag	Vizsgálható szerv	Felhasználó intézmények száma		Vizsgálatok száma	
			1981	1982	1981	1982
Fyton	Sn-izozitol-hexafluorát	csontrendszer	25	25	10 584	16 536
Foszfón	Sn-hidroxietilén-difoszfónát	vese	14	15	3 840	9 504
Citon	Sn-citrát komplex	máj, lép	18	18	3 744	4 872
Pyron	Sn-pirofoszfát	szívizom, csontrendszer	16	15	4 848	6 576

\* A vizsgálat számát üvegenként négy beteg vizsgálhatósága alapján adtuk meg.

4. táblázat. Néhány in vitro készítmény felhasználásának alakulása az utóbbi két évben\*

A készlet neve	A felhasználók száma		Vizsgálatok száma	
	1981	1982	1981	1982
T <sub>3</sub> RIA	35	37	19 057	25 498
T <sub>4</sub> RIA	36	38	23 750	39 311
Hamolsky T <sub>3</sub>	28	27	120 000	100 000
Inzulin RIA	35	31	10 535	12 341
Izotest	13	13	1 060	1 190

\* 1 db 50 csöves készletből 19 vizsgálatot tételeztünk fel.

működésének elégtelensége, terhes nő prosztatahormonszintjének nyomonkövetése stb. céljára. A 4. táblázatban néhány ilyen felhasználás alakulását szemléltetjük. A hazánkban előállított RIA-készletek 1981-ben 300 000 dolláros importot tettek feleslegessé. Az immunológiai vizsgálat jövő fejlődését illetően a szakértők [19] arra a következtetésre jutnak, hogy az Egyesült Államokban az 1978. évi 133 millió dolláros „ligand assay”-termelés 1985-re 387 millióra nő, s ebben várhatóan 216 millió a RIA és 133 millió az enzimassay. A növekedés 1978-tól 1980-ig 35%-os, 1978-tól 1985-ig 290%-os lesz.

Hazánkban az Országos Laboratóriumi Intézet által prognosztizált in vitro RIA-igény a 80-as évek első felére 250 millió forintra nő, több mint 20 készítményből. Ha ezek a becslések beválnak, akkor a RIA-ellátottság az Egyesült Államokban 1985-ben durván 1 \$/fő, hazánkban pedig 0,6 \$/fő lesz.

### **Mezőgazdasági alkalmazás**

A Mezőgazdasági és Élelmezésügyi Minisztériumhoz tartozó izotópfelhasználók főleg speciális kérdésekkel foglalkoznak. Mintegy 20 izotóplaboratóriumban végeznek talaj-, növényvizsgálatokat és állatkísérleteket. A talaj-háttérsugárzás vizsgálatát reguláris MÉM állomásokon rendszeresen ellenőrzik. Három mezőgazdasági sugárkert létesült gamma-sugárzással végzett mutációkísérletekhez. Kísérletek folytak neutronsugárzásokkal is. Néhány intézet mezőgazdasági gyors analitikai, terméshozam-fokozó (regulátor) eljárásokhoz dolgoz ki módszereket. A mezőgazdaság egy további területe a csírázásgátlás, élelmiszer és csomagolóanyag fertőtlenítése stb. céljából végzett besugárzás. A hordozható vagy félig hordozható besugárzóberendezések iparszerű alkalmazásával aprómagvak, hagyma, burgonya stb. sugárkezelése folyik. Az elmúlt évben például 500 t hagymát tartósítottak ezzel a módszerrel. Ilyen feladatra két félüzemi, egyenként 3—5 PBq (80—130 kCi) aktivitású  $^{60}\text{Co}$ -sugárforrás áll rendelkezésre, és egy sokkal nagyobb, 50—70 PBq (1,4—2 MCi) aktivitású létesítésének vizsgálata most folyik a több vállalat és intézmény által létrehozott AGROSTER Besugárzó Közös Vállalatnál.

A mezőgazdasági alkalmazások további területe az állattenyésztés diagnosztikai módszereinek alkalmazása a tenyésztésben és a hústermelésben, elsősorban a humán diagnosztikára kidolgozott készletek felhasználásával.

### **Ipari alkalmazás**

Az iparban mintegy 1000 izotópos mérőhely dolgozik, és több ipari folyamat irányításában vesznek részt. A legelterjedtebb azonban a rutin radiográfiai vizsgálat, közel 90 radiográfiai laboratóriummal. Ezek például a mintegy évi hat millió forint értékű  $^{192}\text{Ir}$ -



sugárforrásokkal több mint 40 iparvállalat sok milliárdos termékének minőségét ellenőrzik. A Medicor Művek 8 PBq (210 kCi) aktivitású,  $^{60}\text{Co}$ -forrású üzeme egyszer használatos fecskendő és egyéb orvosi eszköz sugársterilizését végzi.

Az ipar által még továbbra is művelt másik terület az aktivációs analízis. Ebben az ipari laboratóriumok mellett a Magyar Tudományos Akadémiához tartozó kutatóintézetek is részt vesznek, így a Központi Fizikai Kutató Intézet a Dunai Vasműben a folyamatos acélgyártás ellenőrzésében, és Csepelen a nagy tisztaságú fémek gyártástechnológiájának kialakításában, az Atommag Kutató Intézet pedig a röntgenfluoreszcens, az ESCA és más gyors módszerek alkalmazásával. Az Izotóp Intézet ipari technológiai folyamatok vizsgálata és szabályozása során 1982-ben mintegy 180 ipari kutatási és fejlesztés szerződést kötött, és teljesített.

Az ipari laboratóriumok átlaglétszámából és az egy főre jutó átlagbevételből arra lehet következtetni, hogy e tervidőszak kezdetén az ipari izotópkalkalmazás mintegy 300 millió forint termelési értéket képviselt, az akadémiai kutatóintézetekben és az egyetemi tanszékeken folyó megbízásos tevékenységen kívül.

### **A kutatás és fejlesztés helyzete**

Jelenleg több mint 120 kutatóintézet és egyetemi tanszék használ radioizotópot. Tevékenységükben jelentős az előzőekben körvonalazott ágazati izotópkalkalmazás is, hiszen részt vesznek a gyógyászat, a mezőgazdaság és az ipar mindennapi problémáinak megoldásában.

### **Következtetések és távlatok**

Az előzőekben a helyzet jellemzésére csak néhány nagyobb gyakorlati munkát említettem példának. A részeredményeknek a gyakorlatba való bevezetése és rutin alkalmazásának fejlődése azonban csak az orvostudomány egyes területein tartható elfogadhatónak. Wiesnerhez hasonlóan [20] úgy értékelhetjük a helyzetünket, hogy az alkalmazás számos területén a kezdeti reményeket és várakozást a radioaktív izotóptechnika nem, vagy csak alig váltotta be. Így a

neutronaktivációs elemzés még a tudományos laboratóriumokban sem honosodott meg a várt mértékben, nem is beszélve az iparról. A gyakorlatba való bevezetés hasonlóképpen nem elég eredményes olyan radiometrikus módszereknél sem, mint például a röntgenfluoreszcenciás elemzés.

Mi lehet az általános elterjedés gátja? Három körülményt kell számításba vennünk.

1. A radioaktív izotóptechnika nem önálló tudomány, hanem a kutatási és műszaki problémák megoldásának tudományos módszereken és felismeréseken alapuló segédeszköze. Egy gyakorlatban is használható módszer alkalmazása csak akkor kezdődhet meg, ha az előkészületek azt mutatják, hogy az eljárás a szóban forgó probléma legjobb, legolcsóbb vagy egyetlen lehetséges megoldását szolgáltatja. Aki tudja, hogy az ilyen új módszerek bevezetése mennyi céltudatos apró munkát és mennyi gyakorlati követelmény figyelembevételét követeli meg, az átérzi, hogy az alkalmazási lehetőség bizonyításakor igen sok probléma és feladat vár megoldásra.

2. A vállalatok nem mondhatnak le gazdaságossági szempontjaikról, így azoknak a radioaktív izotópos módszereknek és készülékeknek a bevezetésére fordították figyelmüket, amelyeknél a ráfordítás és a piaci haszon arányban áll egymással. A [20] értékelés szerint az Egyesült Államokban a kutatási eredmények gyakorlati átültetésében a kis vállalatok komoly eredményt értek el, a Német Szövetségi Köztársaságban viszont, iparszerkezeti és pénzügyi okból (adó, pénzgazdálkodási szabályok stb.) nem. Hazánkban is számos vállalat azt a könnyebb megoldást választotta, hogy nem saját fejlesztői részleget hozott létre, hanem megrendelte a módszert, bevezetésével és szervizével együtt. Az NSZK-hoz hasonlóan ránk is érvényes, hogy az izotóptechnikai eredmények gyakorlati bevezetése akkor volt hatékonyabb, amikor élvezte az állam erkölcsi és anyagi támogatását is. Ennek hiányában az elavult módszereket alkalmazzák. Hangsúlyozni szeretném, amit gyakran figyelmen kívül hagynak, hogy a külön-külön kisebb súlyú eredmények összegeződnek, és már a népgazdaság számára is észrevehetően növelik a hatékonyságot.

3. A kutatási eredményeknek a műszaki gyakorlatba való átültetését az alkalmazást célzó módon kell irányítani, hogy meggyor-



suljon, és hatékonysága nőjön. A pénzügyi támogatást nyújtó szervezeteknek is tudniuk kell, hogy az ilyen fejlesztés gyakran sokkal eszközigényesebb, mint a nem alkalmazásra orientált kutatás, mivel költséges műszaki berendezések létrehozása is beletartozik a feladatba.

Az izotópk alkalmazás hazai távlataiban tovább tolódik az arány az orvosi és az ipari alkalmazás között, az orvosi felhasználás javára. Nem jelenti azonban ez azt, hogy ne lennének lehetőségek valamennyi területen. A fejlesztés jó körülményeit már megteremtették az elektrotechnikának azon ágai, amelyek kidolgozták a szoba-hőmérsékleten is jól működő új sugárdetektorokat és a mikroprocesszorokat. A fejlődés várható területei:

- kis intenzitású neutronforrások neutronjának befogásakor keletkező gamma-sugárzás felhasználása vizsgálatra;

- ipari folyamatvezérlés gamma-spektrum elemzésével, hűtés nélküli félvezető detektor felhasználásával;

- a 10—100 keV tartományú béta- és gamma-sugárzás visszaszóródásának felhasználása mikroprocesszorokkal. Mikroprocesszorral tovább bővíthető a méréstechnológiai optimalizálás területe is;

- az elektron-pozitron pár szétsugárzásával végzett háromdimenziós leképezés dinamikus egyensúlyi állapot vizsgálatára az orvostudományban és a biológiában. A módszer új lehetőséget teremt a kémiában is, mivel a pozitron megsemmisülése révén számos gyors reakció, a porózus felületen abszorbeált és adszorbeált anyagok (pl. katalizátorok) tulajdonságai és szerves fémvegyületek viselkedése is tanulmányozható.

## Összefoglalás

A hazai izotóptermelés és -alkalmazás, az említett nehézségek ellenére is, figyelemre méltó eredményeket ért el. Így 1954 óta Magyarországon felhasználtak több mint 230 000 izotópszállítmányt, mintegy 50 PBq aktivitásban. Ha csupán azt tekintjük, hogy a megközelítőleg 40 PBq (1,1 MCi) aktivitást kitevő  $^{60}\text{Co}$ -sugárforrások előállításához majdnem  $10^{25}$  neutronra volt szükség, megítélhetjük, milyen imponáló szerepet játszik ebben a gyakorlati felhasználásban a neutron.

1. J. CHADWICK: *Nature* **129** (1932) 312.
2. BOZÓKY L.: *Magyar Kémiai Folyóirat* **58** (1952) 10.
3. J. BRADFORD et al.: in *Radioisotopes in Industry*. Ed.: J. BRADFORD et al. Reinhold Publ. Co., New York, 1953, p. 2.
4. S. A. LAUGH: in *Radioisotopes in Industry*. Ed.: J. BRADFORD et al. Reinhold Publ. Co., New York, 1953, p. 285.
5. А. М. ПЕТРОСЬЯНЦ: Материалы научно-технической конференции XXX лет производства и применения изотопов в СССР. № 59. Ред. ПЕТРОСЬЯНЦИ др. Атомиздат, Москва, 1980, стр. 3.
6. STRIKER GY.: Sugárzó izotópok hazai felhasználása, I. és II. kötet. OAB Izotópkalmazási Szakbizottság kiadványa, Budapest, 1958.
7. BOZÓKY L.—TÉTÉNYI P.—VARGA K.—KERPEL R.: A II. Izotópkalmazási konferencia előadásainak kivonatai, az OAB Izotópkalmazási Szakbizottság Kiadványa 1 (1960) 1. sz. Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest, 1960.
8. Sugárvédelmi kollokvium előadásai. *Atomtechn. Táj.* **6** (1963) 11. sz.
9. BUJDOSÓ E.—MAKRA Zs.—TÓTH L.: A sugárvédelmi ellenőrzés módszerei, I., II. kötet. Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest, 1965.
10. Symp. o analytických metodách měření activity a stanovení složení a charakteristik radioaktivních preparátů. *Radioisotopy (Prága)* **6** (1965) 385.
11. *Proc. Anal. Chem. Conf.*, Budapest, 1966, p. 360.
12. L. BOZÓKY: in *Proc. 2nd Symp. Health Phys.*, Pécs. Roland Eötvös Phys. Soc., Budapest, 1966, Vol II, p. 31.
13. V. BALATONI: Nukleáris medicinában alkalmazott módszerek és eszközök, KGST Konferencia. *Gamma Művek*, Budapest, 1968.
14. TÉTÉNYI P.: „Radioaktív izotópok a tudományos kutatásban” szimp., MTA Izotóp Intézete, Budapest, 1969; előadásai: *Atomtechnikai Tájékoztató* **13** (1970) 1. sz.
15. А. ВЕРЕШ—И. ПАЛ—Й. МАРТОН: Новые методы получения радиоактивных препаратов. Институт Ядерных Исследований, Варшава, 1969, стр. 1—15.
16. CSÖKE A.—HIRLING J.—MORENT A.—MUZSNAI L.: Nukleáris Gépészeti Konferencia előadásai. MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest, 1970.
17. Й. ХИРЛИНГ: Методы и аппаратура для неразрушающего дефектоскопического контроля с использованием ядерного излучения, Закопане, 1970, стр. 139.
18. *Atomtechnikai Tájékoztató* **13** (1970) 5. sz.
19. J. LANGAN: *Radioassay news* **6** (May/June 1979) 47.
20. L. WIESNER: *Atomwirtschaft-Atomtechnik* **24** (1979) 327.

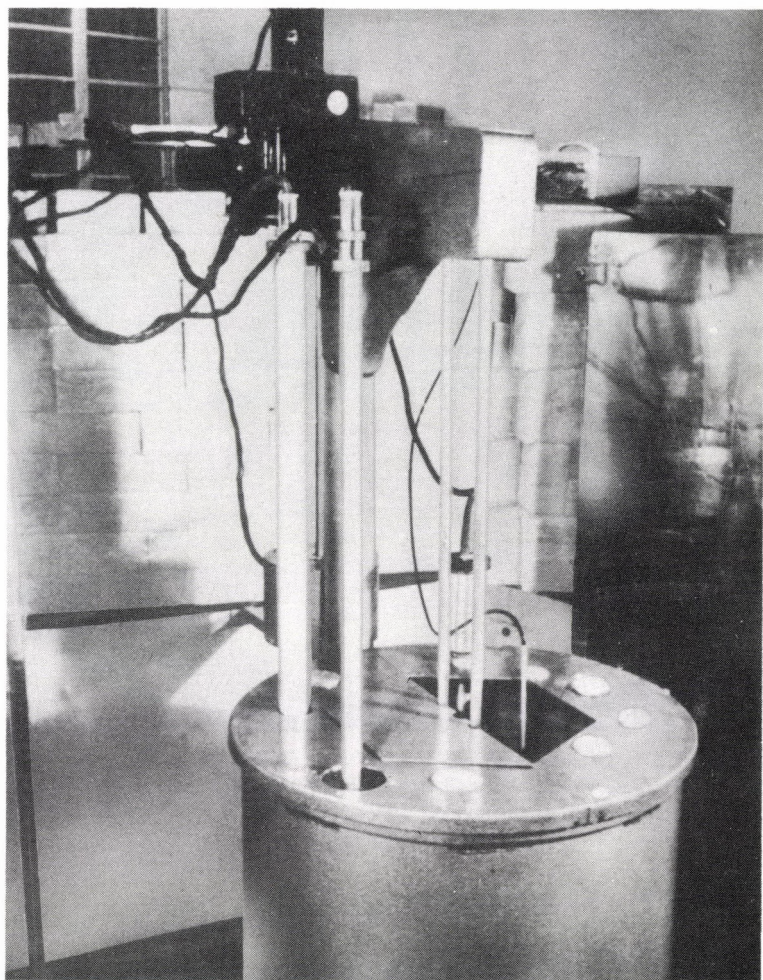


1. К. А. А. (1957) ...
2. К. А. А. (1957) ...
3. К. А. А. (1957) ...
4. К. А. А. (1957) ...
5. К. А. А. (1957) ...
6. К. А. А. (1957) ...
7. К. А. А. (1957) ...
8. К. А. А. (1957) ...
9. К. А. А. (1957) ...
10. К. А. А. (1957) ...
11. К. А. А. (1957) ...
12. К. А. А. (1957) ...
13. К. А. А. (1957) ...
14. К. А. А. (1957) ...
15. К. А. А. (1957) ...
16. К. А. А. (1957) ...
17. К. А. А. (1957) ...
18. К. А. А. (1957) ...
19. К. А. А. (1957) ...
20. К. А. А. (1957) ...

**Melléklet. A hazai neutronfizikai kutatások  
műszaki hátteréről képekben**

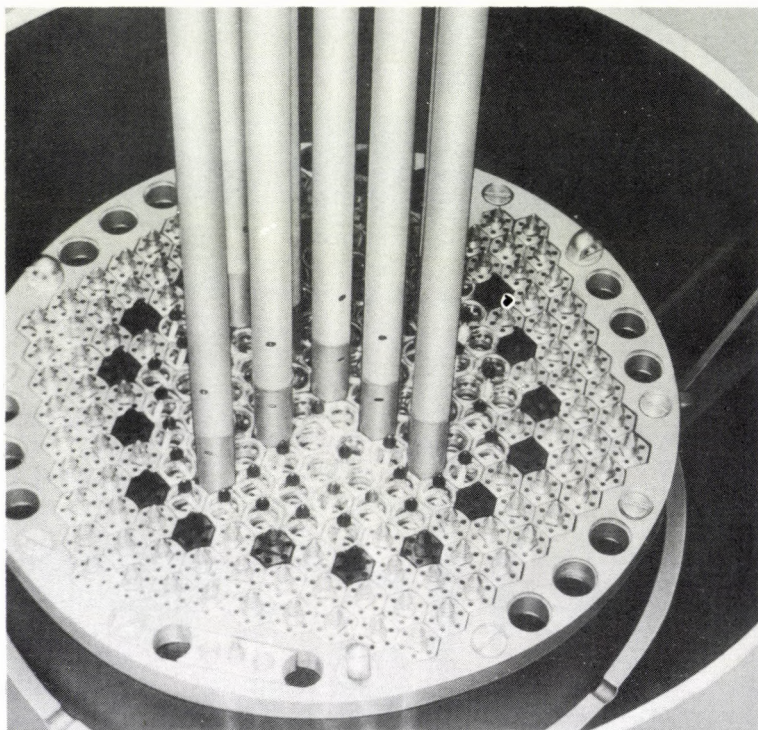




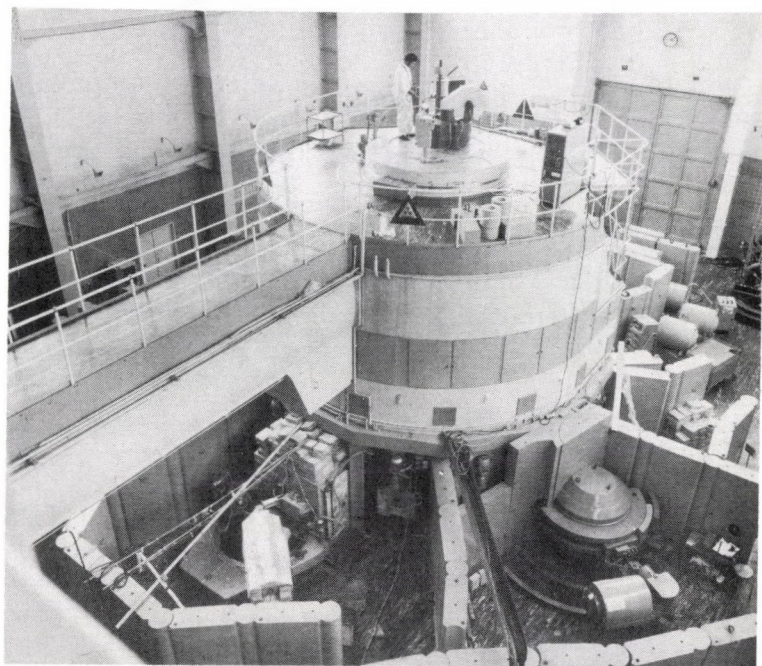


1. kép. ZR-1, könnyűvízzel moderált kritikus rendszer, az első hazai neutronsokszorozó zónatartálya. Az aktív zóna EK-10 jelű szovjet fűtőelemekből épült fel a KFKI-ban 1960-ban, reaktorfizikai mérések céljára



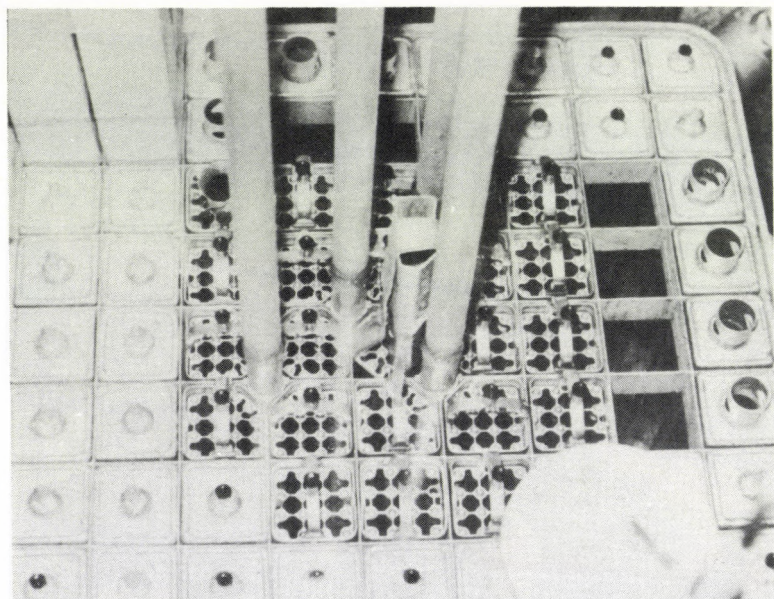


2. kép. ZR-3, amellyel 1967-ben a csillebérci VVRSz-M kutatóreaktor aktív zónájának rekonstrukciójához szükséges előkísérleteket lehetett elvégezni. A VVRSz reaktor rekonstrukció előtt 2 MW, utána 5 MW teljesítményű

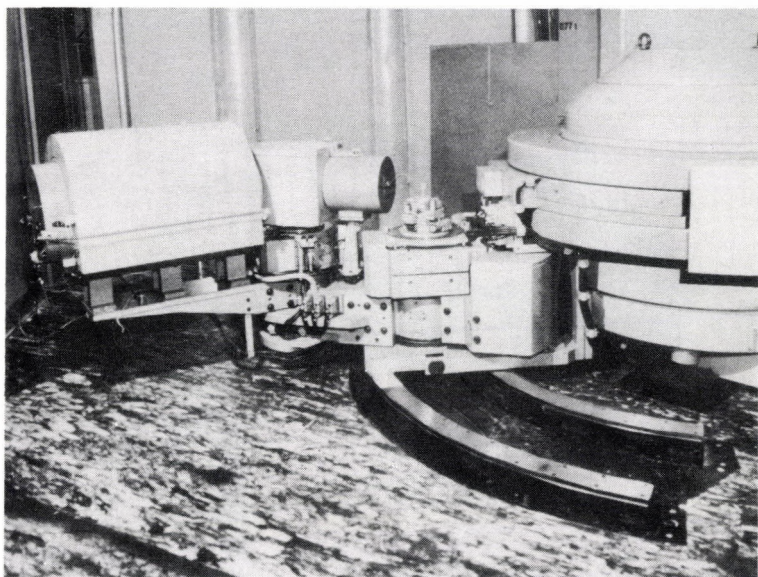


3. kép. Neutronfizikai kísérleti berendezések a csillebérci VVRSz-M kutatóreaktor vízszintes csatornáinál, sugárvédelmi falakkal és neutroncsapdákkal



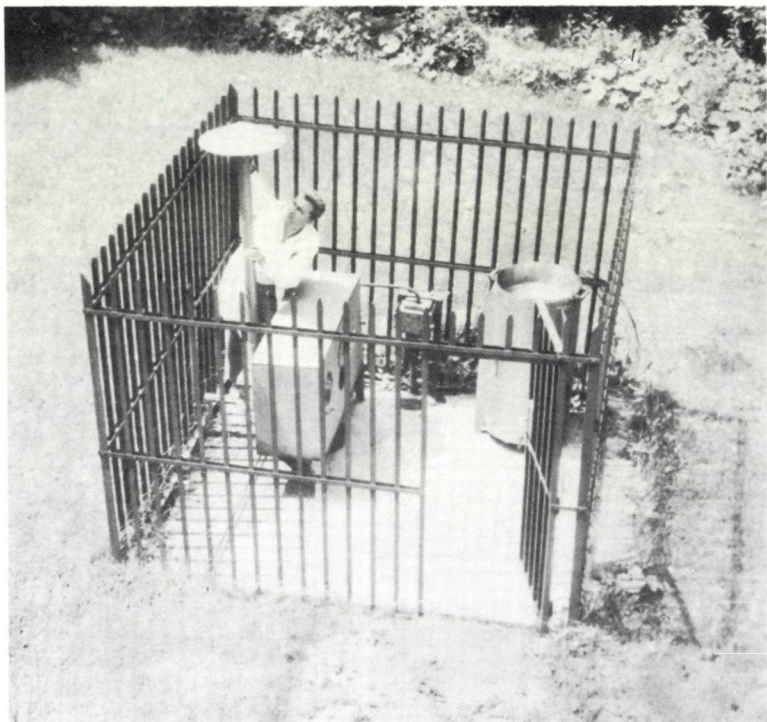


4. kép. ZR-5, a Budapesti Műszaki Egyetem tanreaktora aktív zónájának zéróteljesítményű kísérleti elrendezése a KFKI-ban 1969-ben

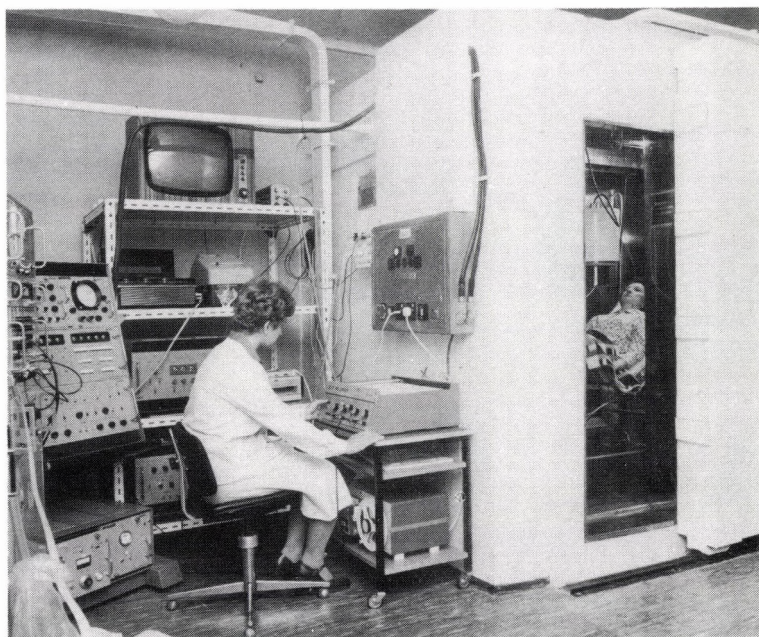


5. kép. Háromtengelyű neutronspektrométer a csillebérci kutatóreaktor 3-as számú vízszintes csatornájánál. A berendezés a moszkvai Kurcsatov Intézet és a KFKI együttműködésében készült. Ennek a 21 tonnás — és emellett 4 szögmásodperc pontossággal beállítható — berendezésnek a mechanikáját a Szovjetunióban, a vezérlő és mérőelektronikáját a KFKI-ban készítették



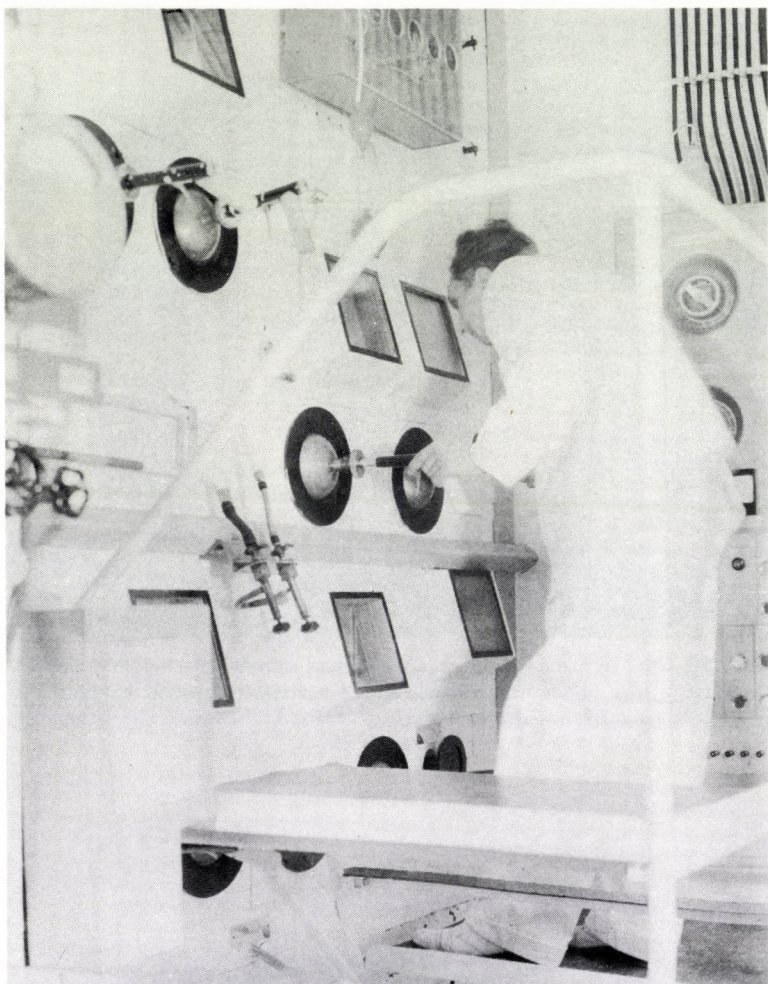


6. kép. A reaktor környezetében felállított mintavevő sugárvédelmi állomás, a levegő radioaktív aeroszoltartalmának ellenőrzésére

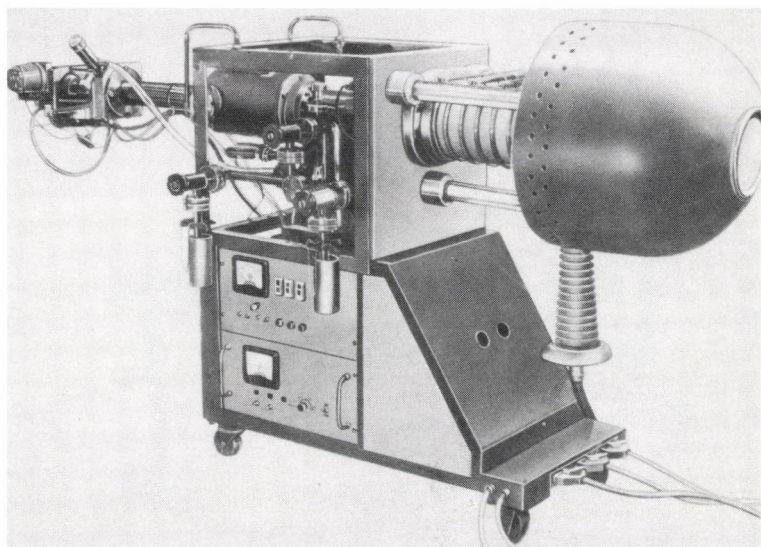


7. kép. Egésztest-számláló berendezés a KFKI-ban, a szervezetbe kerülő radioaktív anyag mennyiségi és minőségi ellenőrzésére. Az „alacsony háttérű” kamra a régi Erzsébet-híd anyagából épült, ami hozzájárul a mérés közben zavaró háttérsugárzás csökkentéséhez



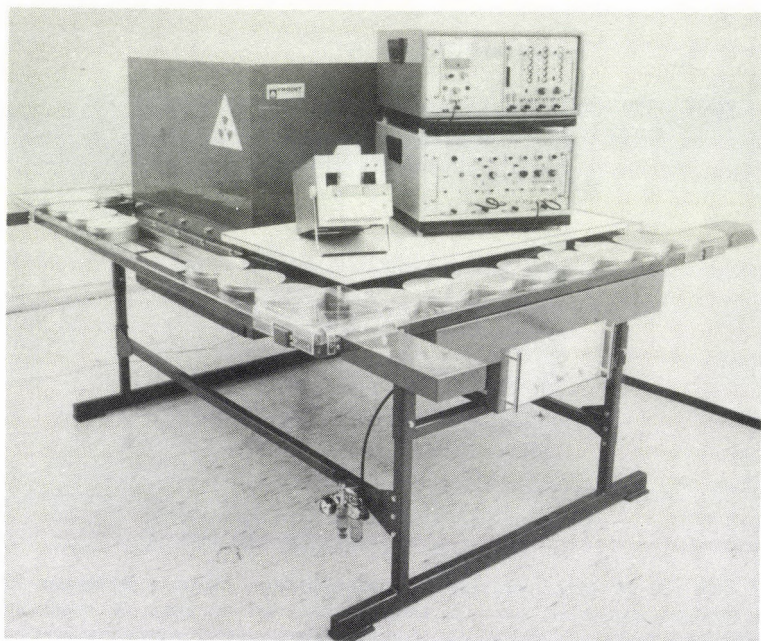


8. kép. „Forrókamrák” gömbcsuklós manipulátorokkal a VVRSz kutatóreaktornál, amelyekben nagy aktivitású sugárzó anyagokkal lehet biztonságosan — és orvosi célra a megkívánt sterilitással — műveleteket elvégezni

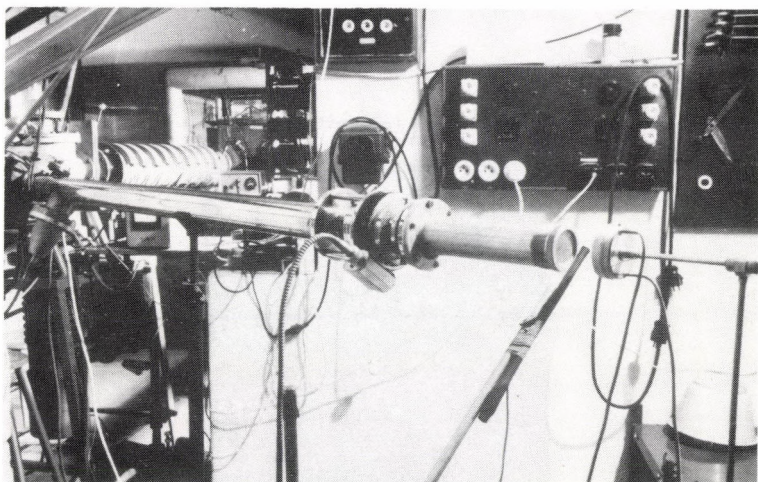


9. kép. 120 kV gyorsítófeszültségű neutrongenerátor, melyet a KFKI-ban kis sorozatban gyártanak, hazai és külföldi aktivációs analitikai és magfizikai laboratóriumok neutronforrásként. A generátor az ionforrást, a gyorsítócsövet és a céltárgyat foglalja magában. Ehhez tápegység, vezérlőpult és pneumatikus csőposta csatlakozik, valamint mérőelektronika. Az exportra gyártott berendezések az alábbi országokba lettek telepítve: Csehszlovákia (6 db), Lengyelország (3 db), NDK (3 db), Bulgária (2 db), továbbá Afganisztán, Brazília, Kuba, Mongólia, Szovjetunió, Vietnam 1—1 db

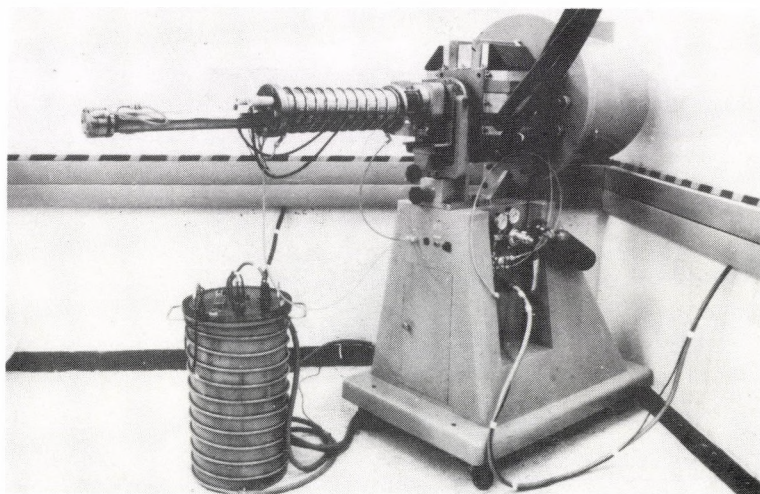




10. kép. AutoPRODET elnevezésű berendezés, amely mezőgazdasági eredetű anyagok — szemestermény, keveréktakarmányok — nyersfehérje- (nitrogén-) tartalmának mennyiségi meghatározását teszi lehetővé

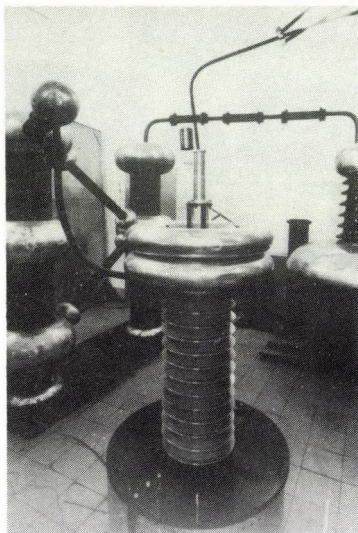


11. kép. A KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékének folytonos üzemű, nagy energiateljesítményű neutrongenerátora, nukleáris adatok meghatározására

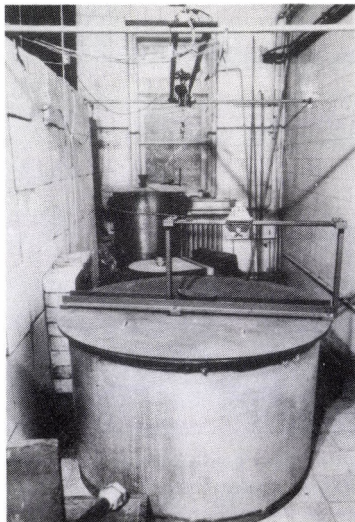


12. kép. A KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékének mikroszekundumos impulzusüzemű neutrongenerátora, reaktorfizikai és geológiai alkalmazásokra





13. kép. A KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékének nanoszekundumos impulzusüzemű, 300 kV-os neutrongenerátora, neutronspektroszkópiai célokra



14. kép. A KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékének kalifornium-252 neutronforrása gyakorlati alkalmazásokra és nukleáris adatok mérésére

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó és Nyomda főigazgatója  
A szerkesztésért felelős: Szenté László — Műszaki szerkesztő: Csákvári András  
A borító- és kötésterv Somlai Vilma munkája

Terjedelem: 9,3 (A/5) iv + mű melléklet — AK 1709 k 8690

HU ISSN 0231—2700

85.13465 Akadémiai Kiadó és Nyomda — Felelős vezető: Hazai György





hogy az esetek többségében a tisztán tudományos felismerésből előbb-utóbb gyakorlati, társadalmi-gazdasági tényező is válhat.

A könyvben a fájdalmasan aktuális katonai kérdések nem kapnak teret. Szerepel ugyanakkor az atomenergia békés felszabadítása valamint sok más tudományos és alkalmazott tudományos probléma, amelyeknek jelentősége szintén nagy. Ezekről az eredményekről számol be a könyv, kiemelten hangsúlyozva a magyar kutatásokat.

*A sorozat előző kötete*

**3. kötet**

**Veres Árpád**

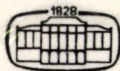
**MAGIZOMEREK  
GAMMA-AKTIVÁCIÓJA  
ÉS ALKALMAZÁSUK**

**Hordósy Gábor—Hrehuss Gyula:**

**A TOKAMAK**

*197 oldal, 58 ábra, 3 táblázat*

*13 x 19 cm · Kötve 48,— Ft*



**Akadémiai Kiadó · Budapest**



**Ara: 59,— Ft**

**ISBN 963 05 3924 1**